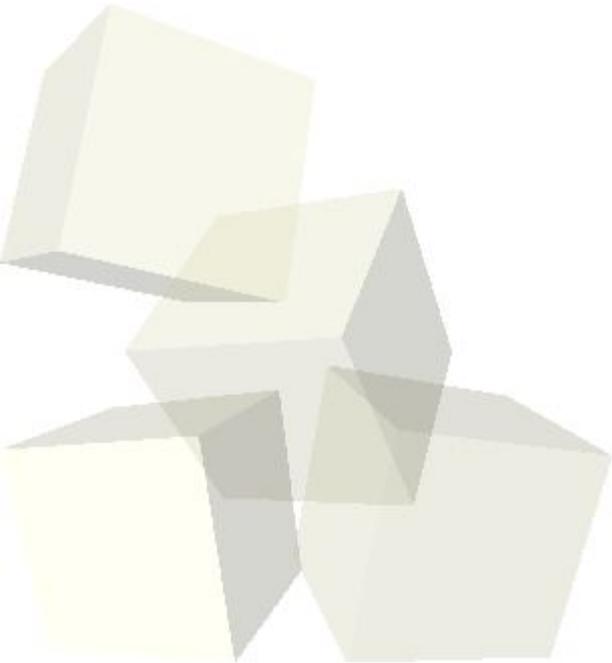




Курс «Нейронные сети и системы нечеткой логики»

Лекция 4

Применение нейронных сетей в системах автоматического регулирования





Типовые структуры систем регулирования с нейронными сетями

1. Нейрорегулятор – простейшая схема автоматического регулирования, в которой нейронная сеть реализует какой-либо регулятор в замкнутой отрицательной обратной связью системе.
2. Система регулирования с обратной моделью – система с максимальным быстродействием.
3. Система регулирования с опорной моделью – многоуровневая система регулирования, применяемая в тех случаях, когда математическое описание объекта регулирования точно не известно.
4. Система с предиктивным управлением – сложная нейронная структура, предсказывающая отклик объекта регулирования на заданное воздействие с оптимизацией динамики всей системы.
5. Системы регулирования с линеаризацией обратных связей – система регулирования, позволяющая компенсировать нелинейности в объекте.



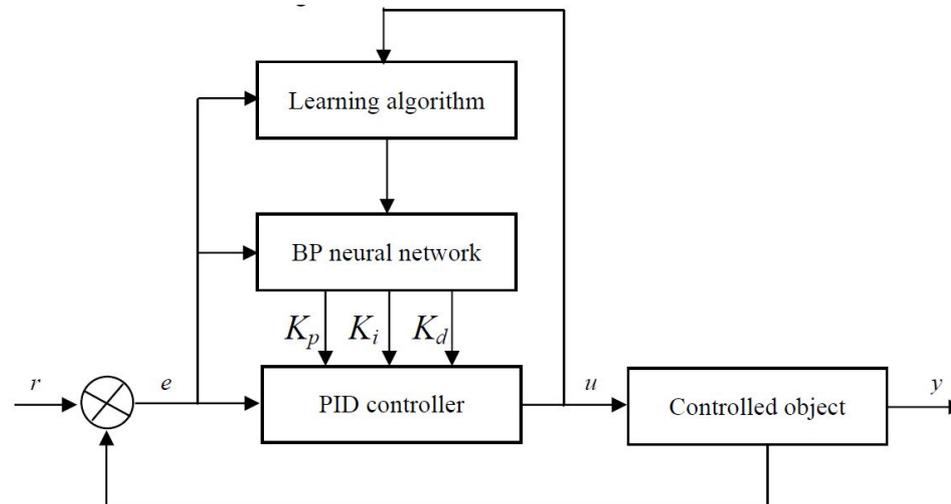
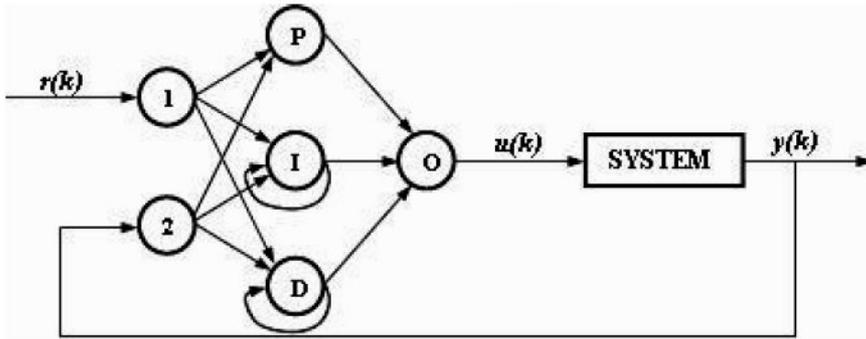
Нейрорегулятор

Простейшая нейронная структура, используемая в системах регулирования.

Возможны различные варианты структур таких систем.

Простейший случай – сравнение поведения системы с некоторым эталонным сигналом и соответствующая корректировка весовых коэффициентов.

Нейронные структуры такого типа могут применяться, например, для подбора коэффициентов ПИД-регулятора.





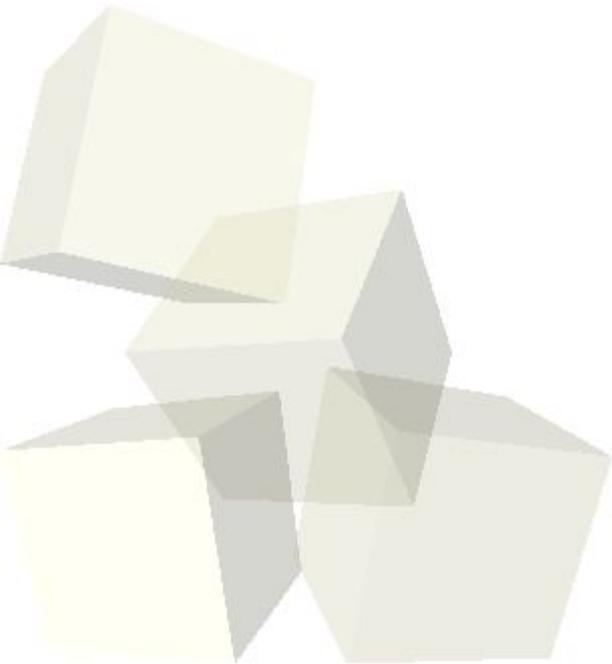
Нейрорегуляторы

Преимущества реализации нелинейных регуляторов с помощью нейронных сетей:

1. Не требует наличия математического описания объекта;
2. Обучение по примеру;
3. Возможность работы в реальном времени за счет параллельной обработки информации;
4. Адаптивность;
5. Малая чувствительность к неполноте предоставляемой информации.

Недостатки:

1. Необходимость получения достаточного набора данных для обучения;
2. Плохая повторяемость результатов обучения;
3. Сложность математического обоснования выбранной структуры регулятора.



Система с мгновенной линеаризацией объекта

В основе метода мгновенной линеаризации объекта (instantaneous linearization) – получения параметров линейного регулятора для системы в текущей точке за счет ее линеаризации. Достигается это за счет применения авторегрессионной сети:

$$\hat{y}(k) = \mathbf{M}(\mathbf{x}(k), \mathbf{w}),$$

$$\mathbf{x}(k) = [y(k-1) \dots y(k-n_y), u(k-n_k) \dots u(k-n_u-n_k+1)]^T$$

для которой линеаризация осуществляется по выражениям:

$$\hat{y}(k) \Big|_{k=\kappa} = y(k-1) - a_1 \Delta y(k-1) - \dots - a_{n_y} \Delta y(k-n_y) + b_0 \Delta u(k-n_k) + \dots + b_{n_u} \Delta u(k-n_u-n_k+1),$$

$$a_i = - \left. \frac{\partial \mathbf{M}(\mathbf{x}(k), \boldsymbol{\theta})}{\partial y(k-i)} \right|_{k=\kappa}, \quad i = 1 \dots n_y,$$

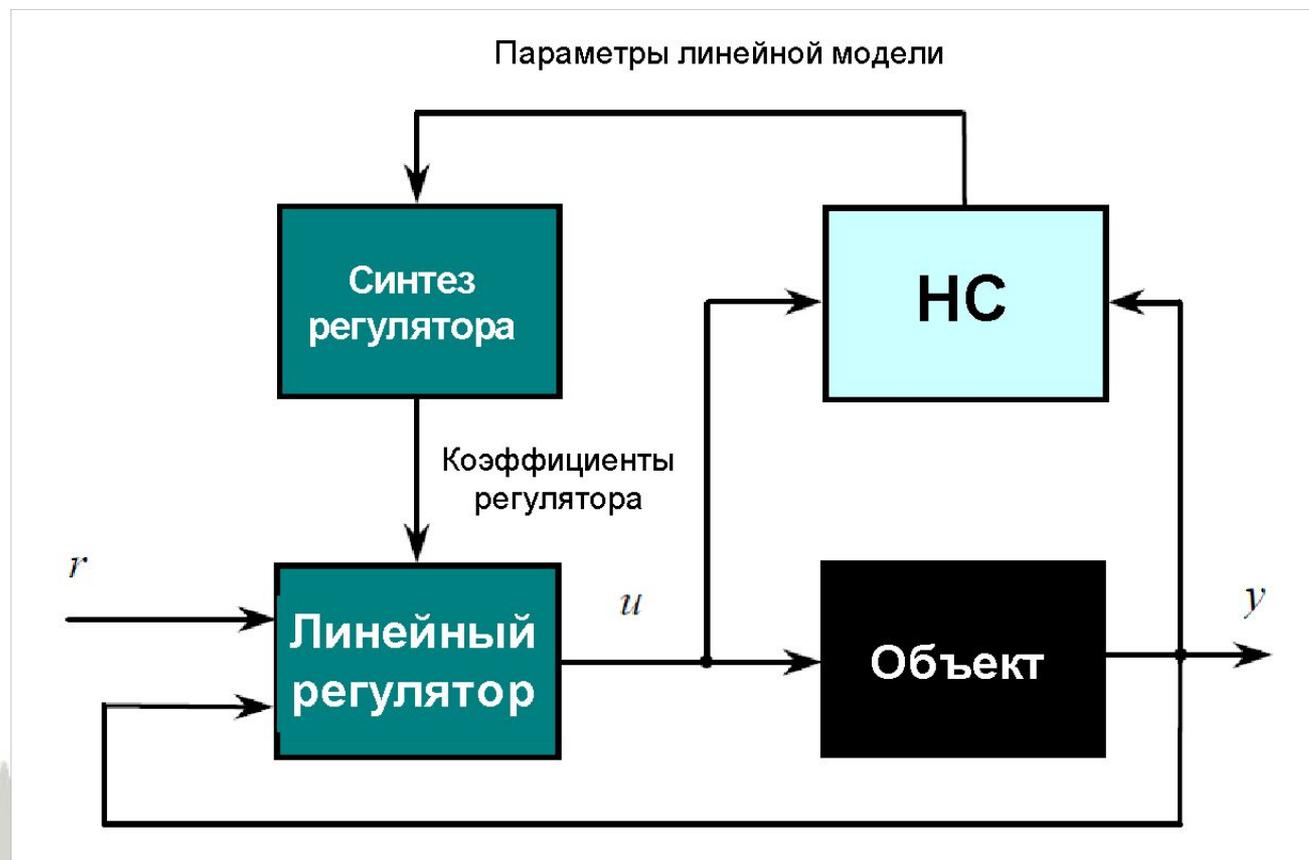
$$b_j = \left. \frac{\partial \mathbf{M}(\mathbf{x}(k), \boldsymbol{\theta})}{\partial u(k-j)} \right|_{k=\kappa}, \quad j = 0 \dots n_u + n_k - 1,$$

$$\Delta y(k-i) = y(k-i) - y(k-i-1),$$

$$\Delta u(k-j) = u(k-j) - u(k-j-1).$$

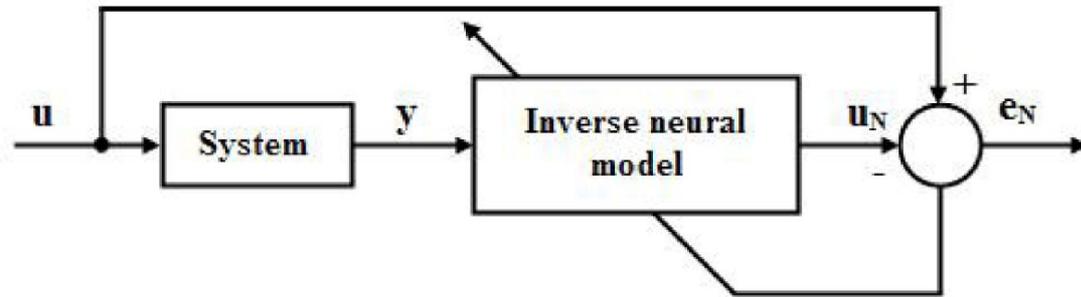
При этом частные производные можно получить непосредственно из нейронной сети, что дает возможность осуществить непосредственный переход к синтезу линейного регулятора.

Система с мгновенной линейризацией объекта

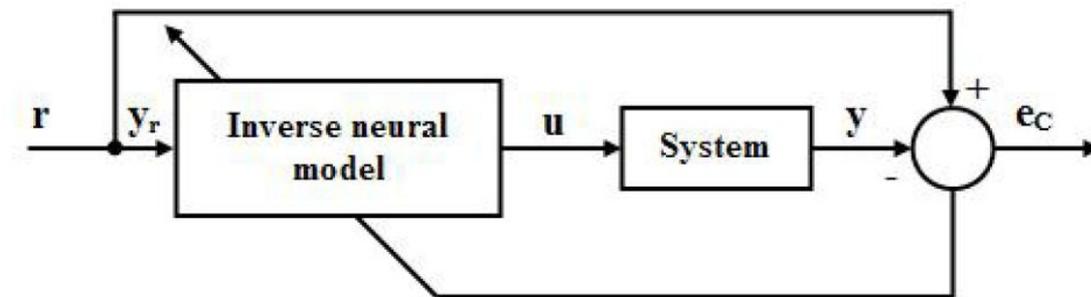




Регулирование с обратной моделью (Direct-Inverse-Control)



«Классическая» схема обучения сети



«Специализированная» схема обучения сети

С помощью нейронной сети реализуется обратная модель объекта регулирования.

Идеальный случай – полная компенсация передаточной функции объекта.

На самом деле – достижение максимального быстродействия системы.

Существует два варианта обучения сети. «Классическая» схема обучения предполагает сравнение выхода нейронной сети с поданным на вход объекта сигналом (обучение в режиме оффлайн).

«Специализированная» схема обучения сравнивает выход объекта регулирования с заданием, поданным на вход нейронной сети (возможно обучение в режиме онлайн).



Регулирование с обратной моделью

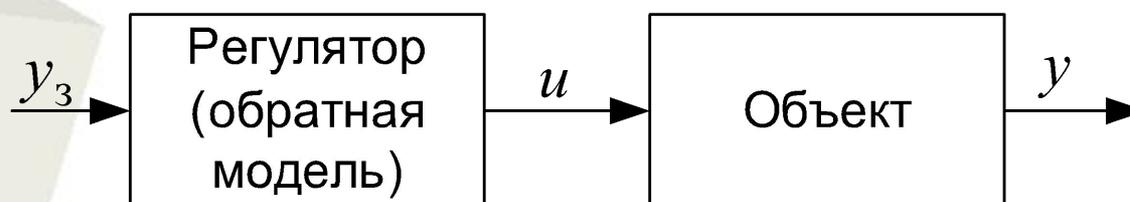
Обучение в режиме оффлайн не всегда можно применить к современным мехатронным системам, в которых объект может быть неустойчивым, а это делает невозможной работу такой системы регулирования, поскольку после окончания обучения обратная связь отключается.

К основным недостаткам обучения в режиме онлайн можно отнести сложность вычисления градиента функции ошибки, поскольку при адаптации весовых коэффициентов не используется непосредственно сигнал выхода нейронной сети. Кроме того, необходимо провести предварительное обучение в режиме оффлайн, поскольку начальные значения весовых коэффициентов могут привести к значительной ошибке регулирования, что может привести к поломке оборудования.

Максимальной быстродействием означает приближение полюсов характеристического полинома замкнутой системы к точке начала координат, что может привести к неустойчивости полученной системы или же к высокой степени ее колебательности.

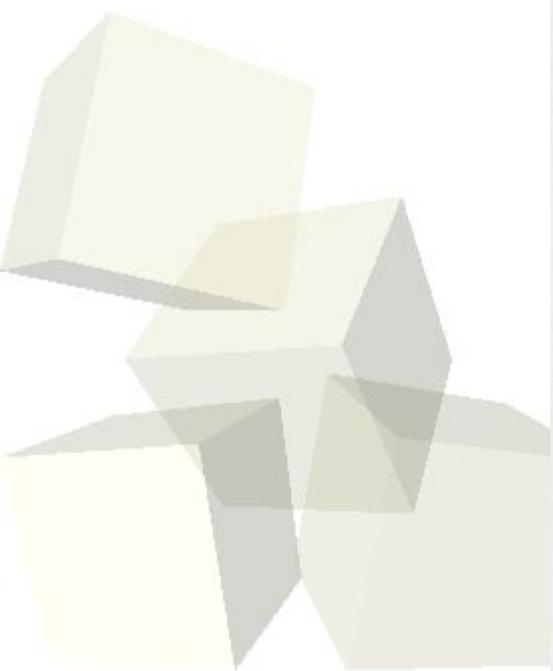
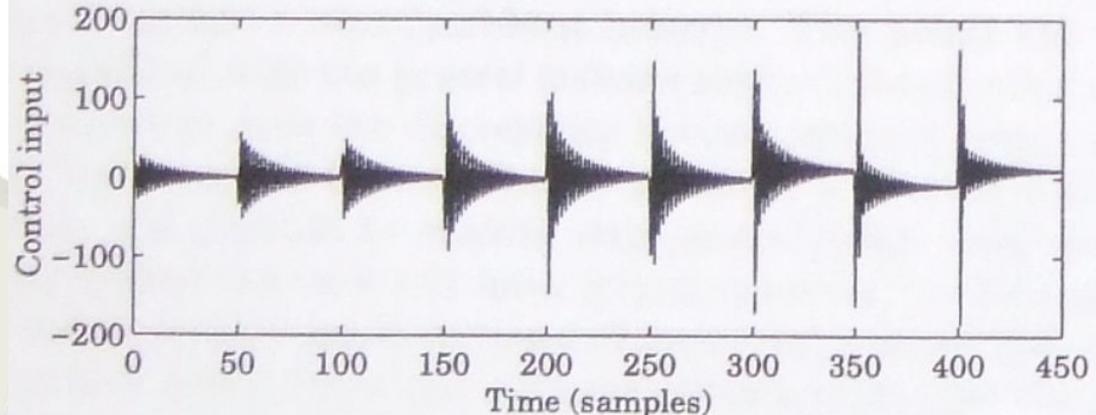
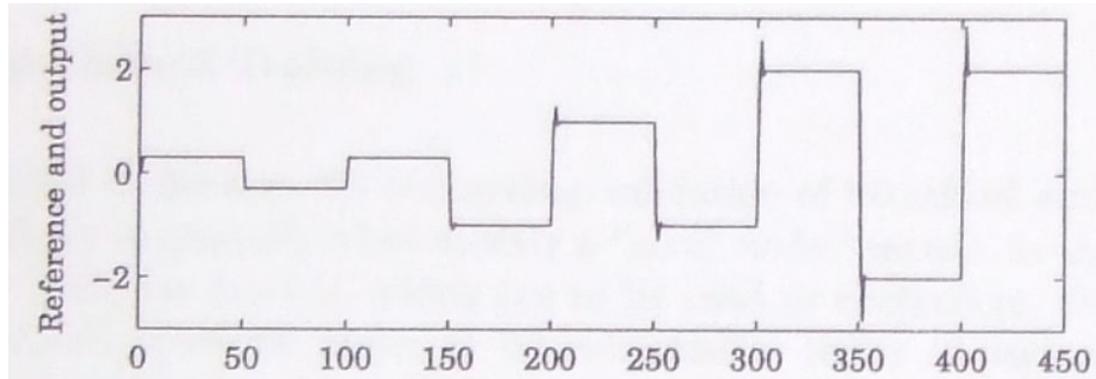
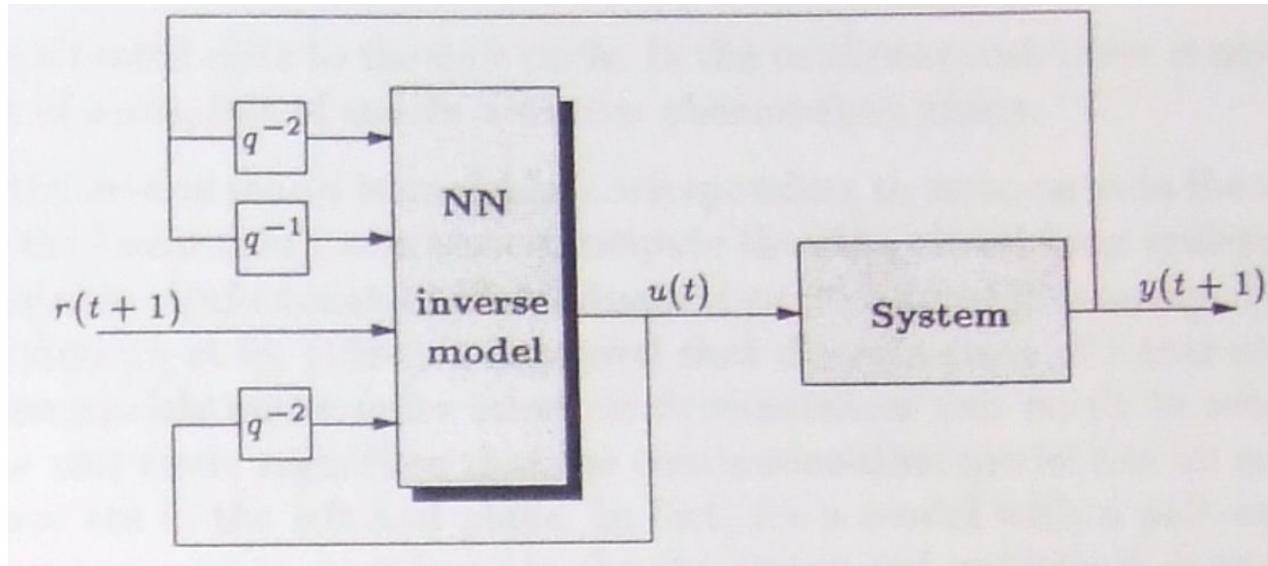
При отработке задающих воздействий, не участвовавших в обучении, возможно появление существенной погрешности в работе нейронной сети.

Указанные структуры крайне чувствительны к точности модели объекта регулирования, а также к помехам в сигналах обратных связей.





Регулирование с обратной моделью

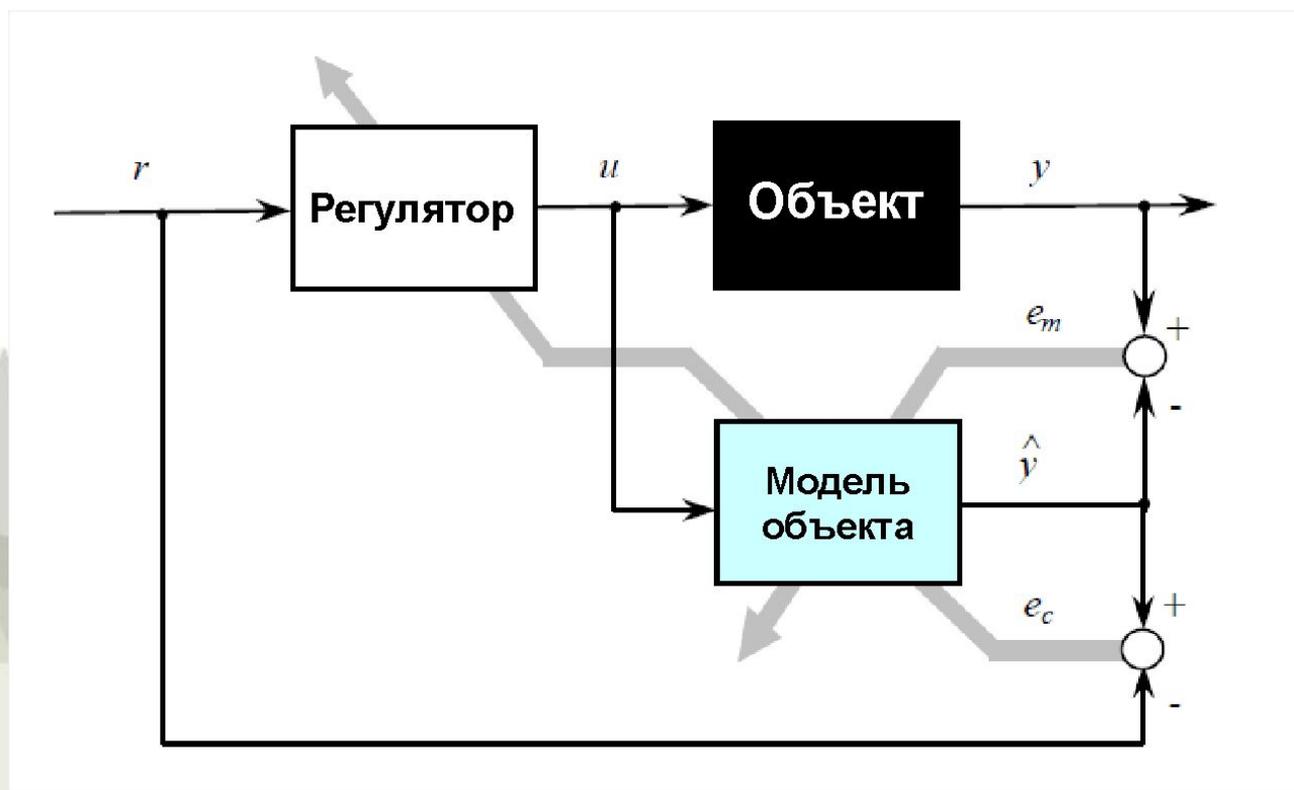




Косвенное нейронное регулирование

Косвенное нейронное регулирование (feedforward inverse control, specialized inverse learning) – усовершенствованный метод регулирования с использованием обратной модели, который включает в себя предварительный этап идентификации самого объекта. Адаптация весовых коэффициентов регулятора выполняется по сигналу рассогласования задания на некоторую координату и выходом модели объекта.

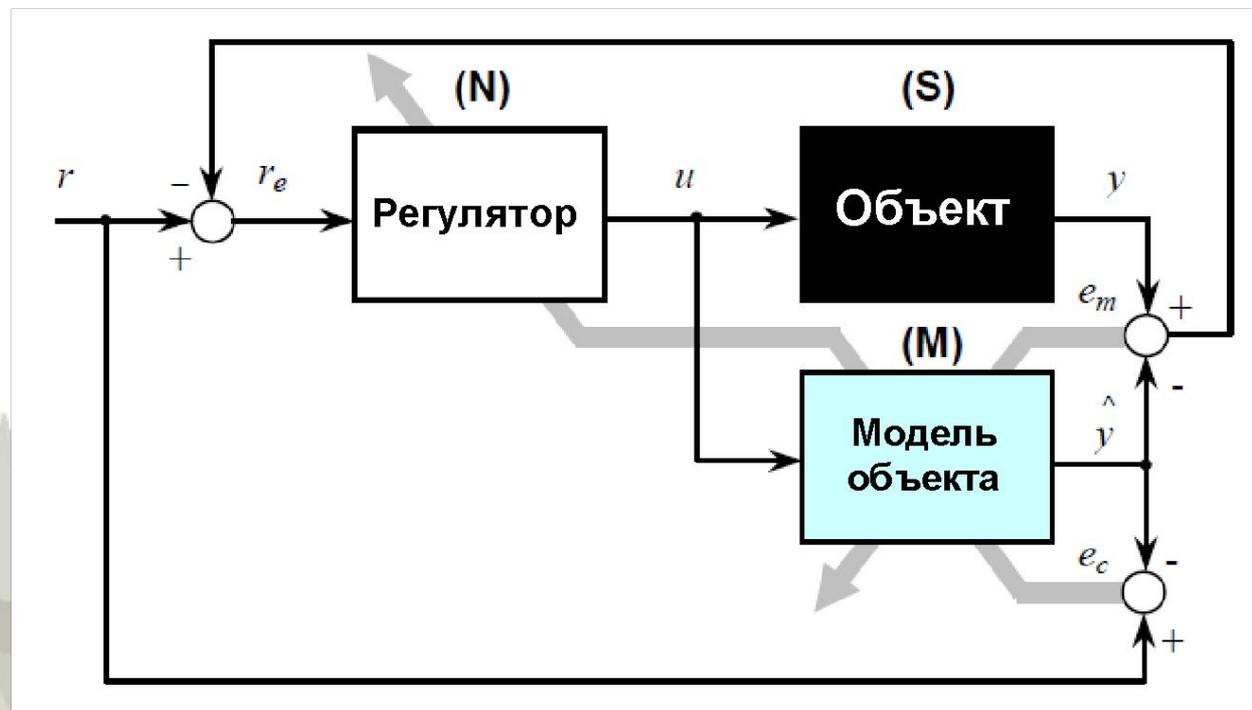
Такой подход позволяет улучшить процесс обучения регулятора за счет вычисления производных от измеряемого сигнала непосредственно при идентификации.



Регулирование с внутренней моделью (internal model control)

Internal Model Control – система регулирования с обратной и эталонной моделями, которая отличается от системы с косвенным регулированием наличием дополнительной обратной связи, как это показано на рисунке.

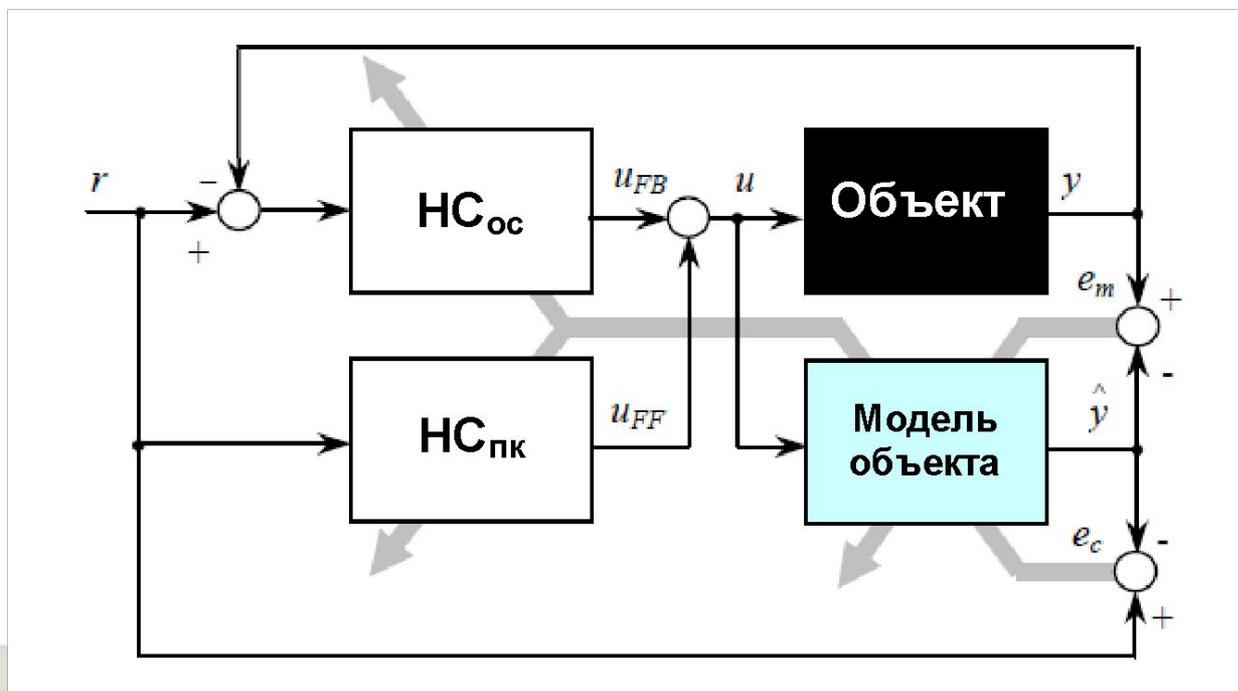
Если модель абсолютно идентична объекту, то имеем разомкнутый контур регулирования, идентичный обычной системе регулирования с обратной моделью, в которой будет отсутствовать статическая ошибка, если регулятор в точности воспроизводит обратную модель объекта.





Двухканальное регулирование

Двухканальная система регулирования (feedforward feedback error control) отличается от системы регулирования с внутренней моделью наличием второго нейрорегулятора, который выполняет функцию предупредления. За счет этого реализуется замкнутая система регулирования.

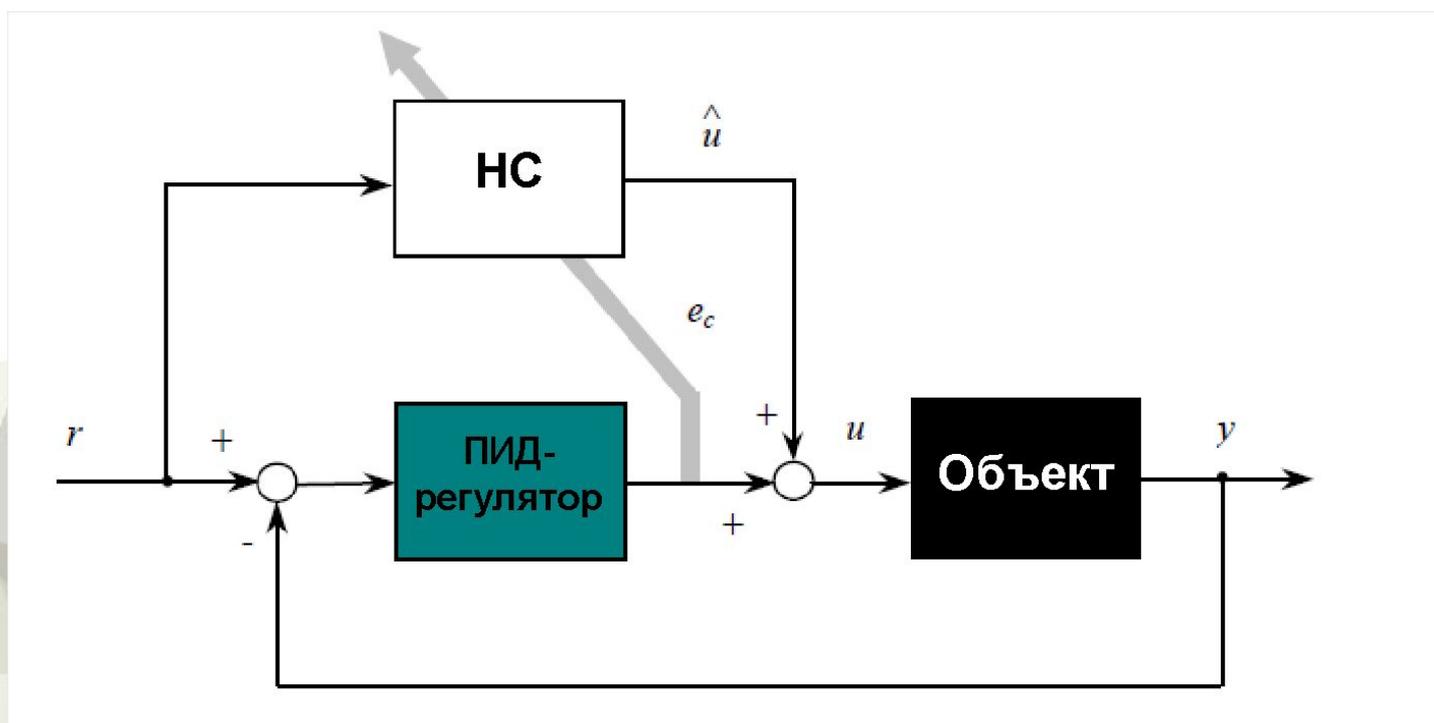




Регулирование с обучением по сигналу обратной связи

Feedback-Error-Learning Control – замкнутая система регулирования с использованием обратной модели, в которой основной задачей нейросети является минимизация выходного сигнала ПИД-регулятора.

По окончании обучения нейросеть полностью перенимает на себя задачи регулирования, формируя таким образом обратную модель объекта. Преимуществом такого подхода является возможность стабилизации объекта за счет ПИД-регулятора. Кроме того обучение сети проводится без идентификации объекта, но скорость обучения в значительной степени зависит от выбранных коэффициентов регулятора.



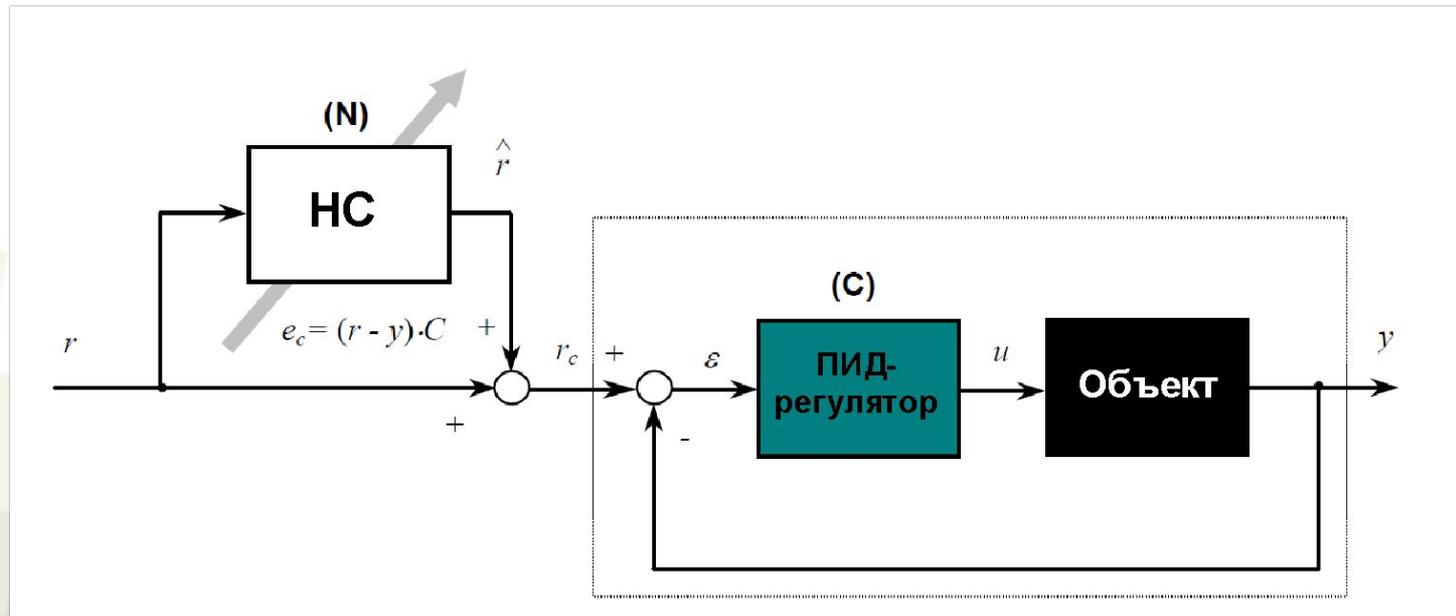
Регулирование с компенсацией опорного сигнала

Reference compensation technique – особый подход к созданию обратной модели объекта, в котором при обучении сети используются сигналы задания и управляющего воздействия.

$$e_c = (r - y) \cdot C = u - \hat{r} \cdot C$$

Это значительно упрощает процесс реализации такой системы.

Недостатком является невозможность инициализации весовых коэффициентов случайными числами.



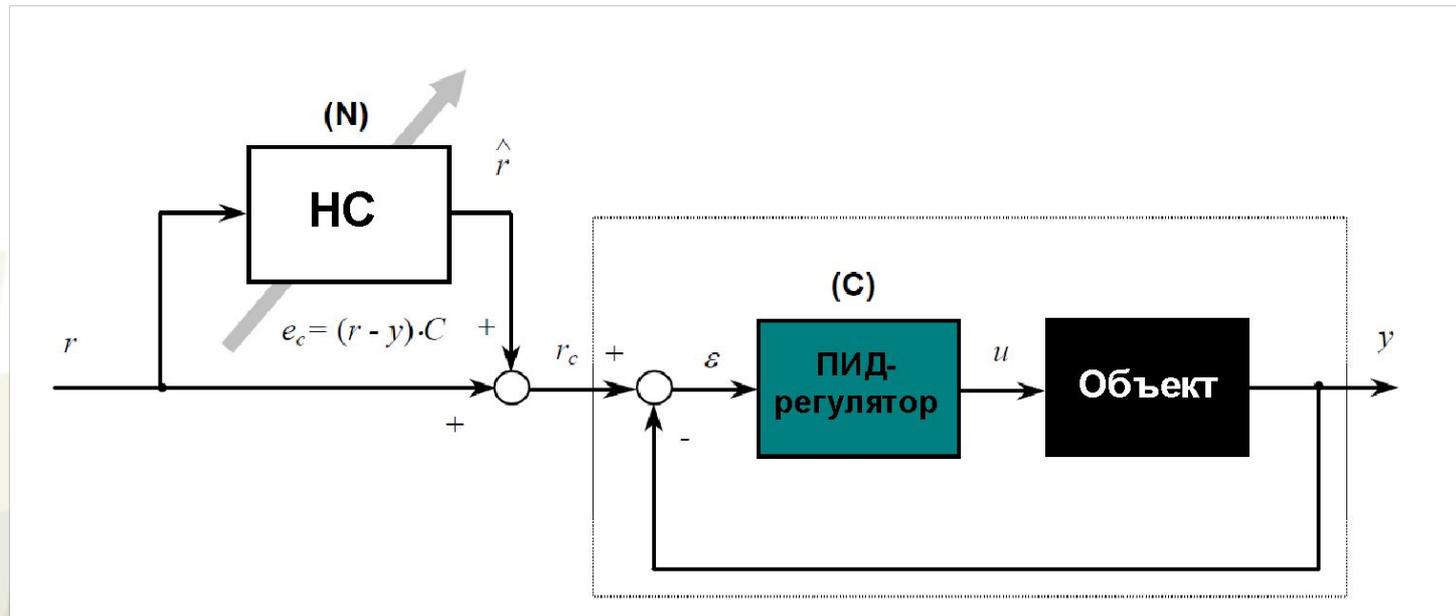
Регулирование с компенсацией опорного сигнала

Reference compensation technique – особый подход к созданию обратной модели объекта, в котором при обучении сети используются сигналы задания и управляющего воздействия.

$$e_c = (r - y) \cdot C = u - \hat{r} \cdot C$$

Это значительно упрощает процесс реализации такой системы.

Недостатком является невозможность инициализации весовых коэффициентов случайными числами.



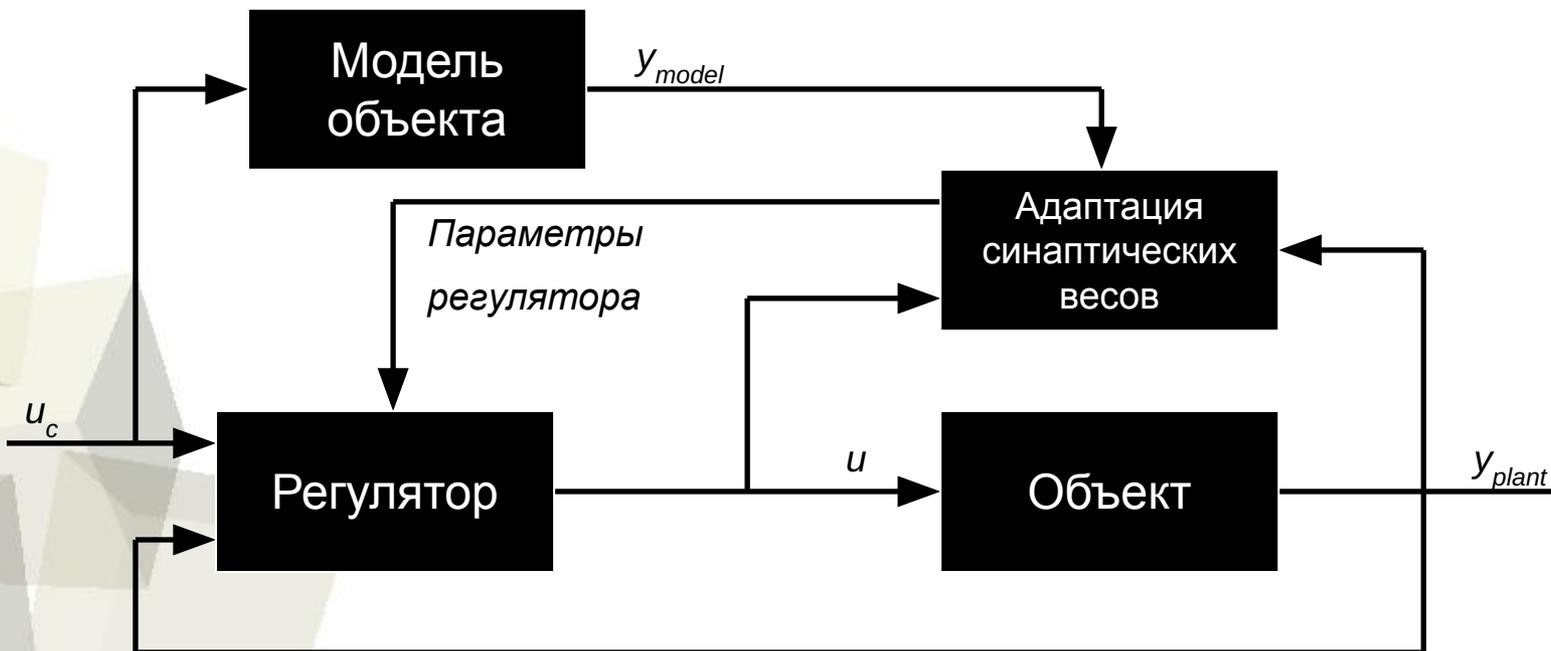
Системы регулирования с опорной моделью

Model Reference Adaptive Control (MRAC) – система автоматического регулирования, которая позволяет управлять объектом при отсутствии его точного математического описания.

В качестве эталонного сигнала берется выход опорной модели, которая может по параметрам отличаться от реального объекта регулирования.

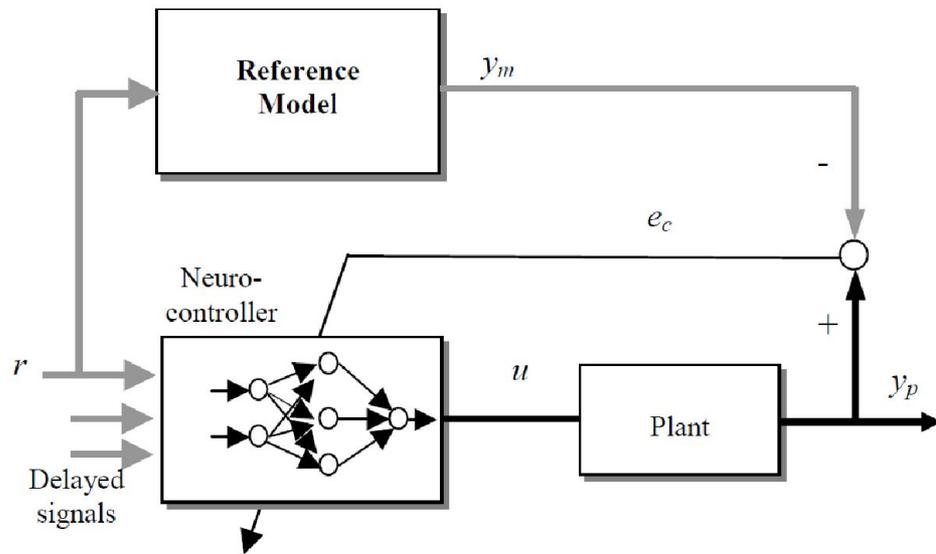
Регулятор синтезируется так, чтобы объект как можно точнее воспроизводил поведение идеализированной модели (ошибка = $y_{plant} - y_{model} \Rightarrow 0$)

При синтезе необходимо задаться идеализированной моделью, структурой регулятора и коэффициентами обучения.

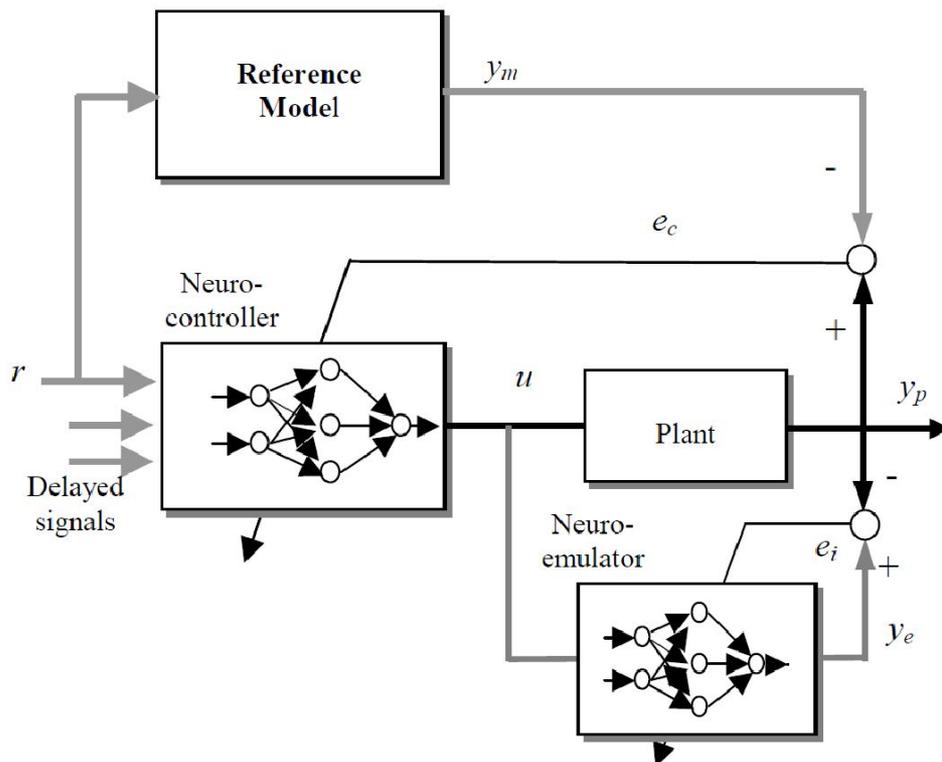




Варианты MRAC-систем



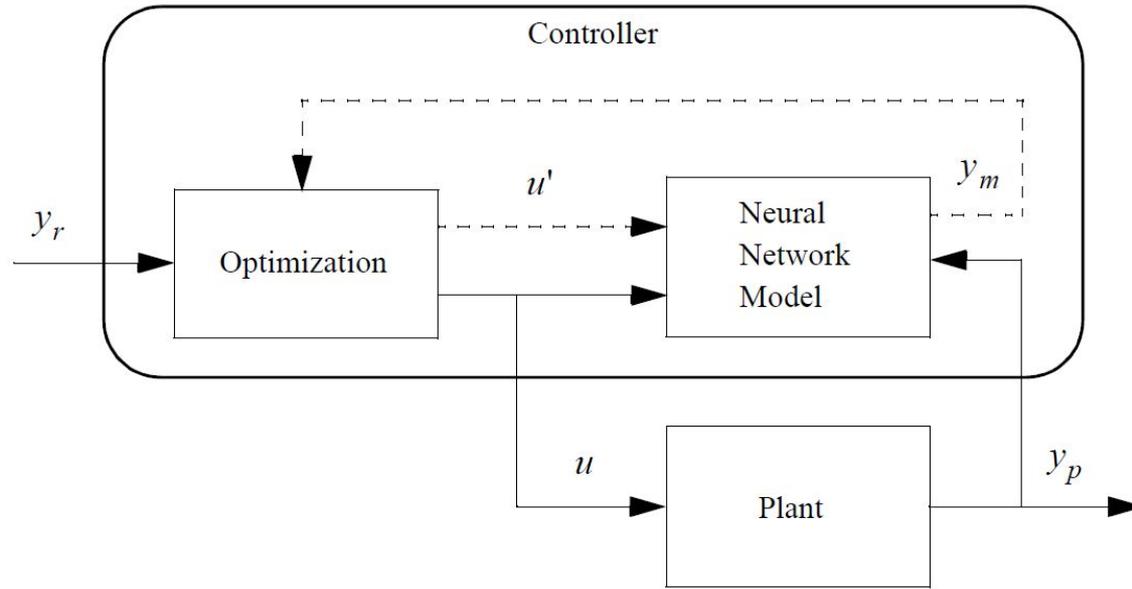
Прямое управление с опорной моделью – подразумевает наличие достаточно точной информации об объекте регулирования и возможности подачи на него управляющего воздействия в любой момент времени.



Косвенное управление с опорной моделью подразумевает использование наблюдателя, часто нейронной сети, для идентификации объекта регулирования.



Предиктивное управление



Системы с предиктивным управлением применяются для оптимизации закона управления объектом в режиме онлайн в соответствии с некоторым критерием. Структуры такого типа могут предсказать поведение объекта регулирования при отработке заданного входного воздействия. Такой подход позволяет скорректировать входной сигнал таким образом, чтобы минимизировать некоторый критерий оптимальности поведения системы.



Предиктивное управление

В качестве критерия оптимизации зачастую выбирают следующую функцию:

$$J = \sum_{i=N_1}^{N_2} [\hat{y}(k+i) - r(k+i)]^2 + \sum_{i=0}^{N_u-1} \lambda_i [\Delta u(k+i-1)]^2 ,$$

$r = [r(k+N_1) \dots r(k+N_2)]^T$ - заданная траектория;

$\hat{y} = [\hat{y}(k+N_1) \dots \hat{y}(k+N_2)]^T$ - результат прогнозирования;

$u = [u(k+1) \dots u(k+N_u)]^T$ - вектор управляющих воздействий;

N_1 - минимальный горизонт прогнозирования;

N_2 - максимальный горизонт прогнозирования;

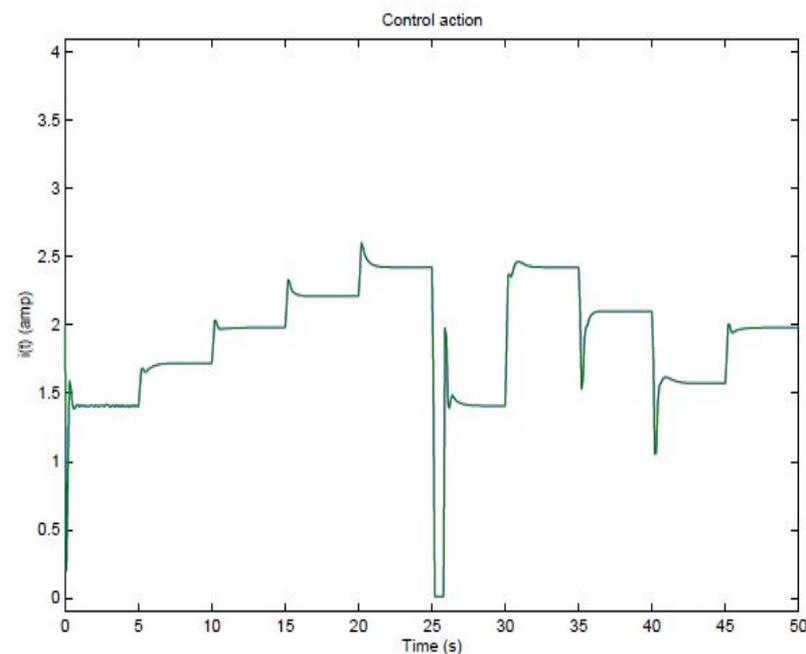
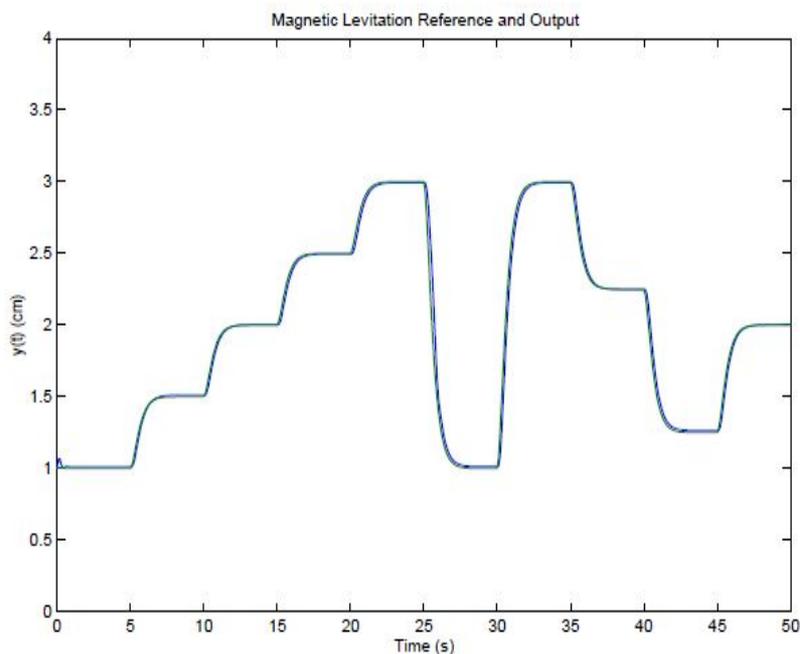
N_u - горизонт управляющего воздействия;

λ_i - весовой коэффициент;

Δ - оператор разности;

Пример применения системы с предиктивным управлением

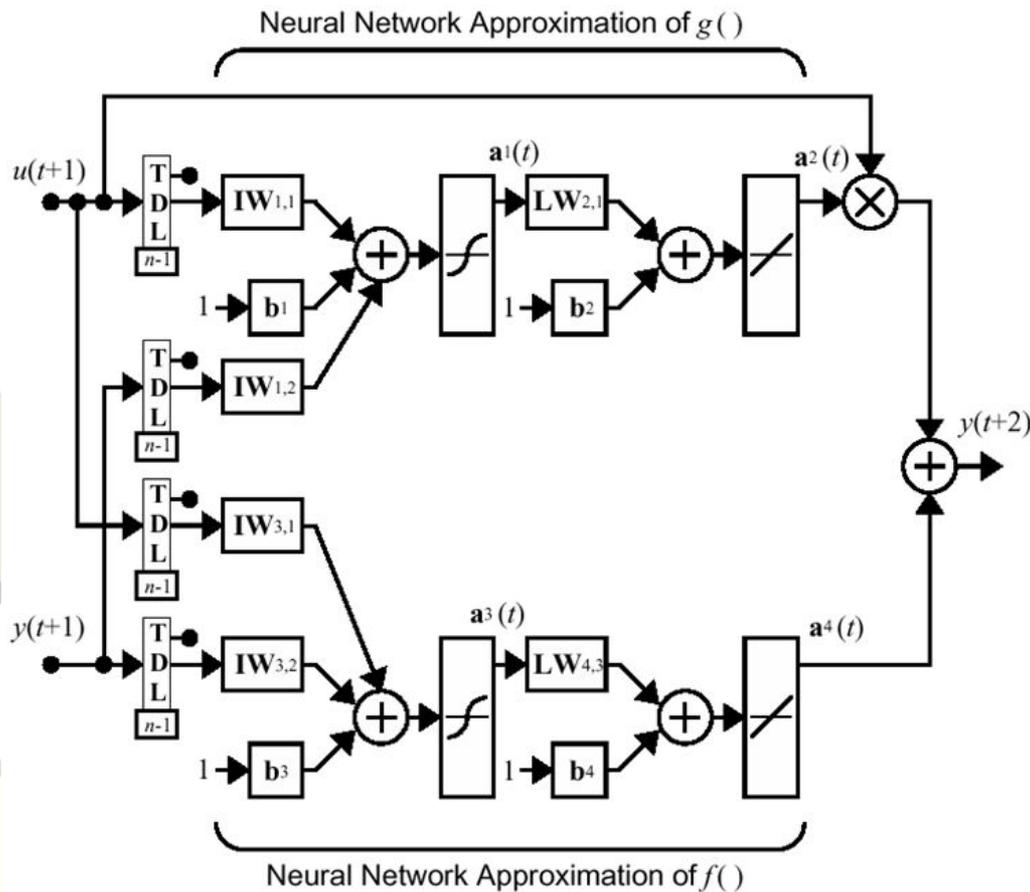
Система с предиктивным управлением используется для стабилизации магнита в заданной точке магнитного поля. Критерием оптимальности в данном случае является точная отработка заданной траектории с возможностью надежной фиксации текущей позиции.



Система с линеаризацией обратной связи

Системы управления с линеаризацией обратной связи используют специальную форму NARMAX-регрессоров, поэтому часто их обозначают как NARMA-L2 регуляторы.

В общем случае объект представляется или аппроксимируется в виде системы в сопроводительной форме, т.е. с последовательным соединением интеграторов. Задачей такого регулятора является линеаризация объекта за счет компенсации нелинейностей.



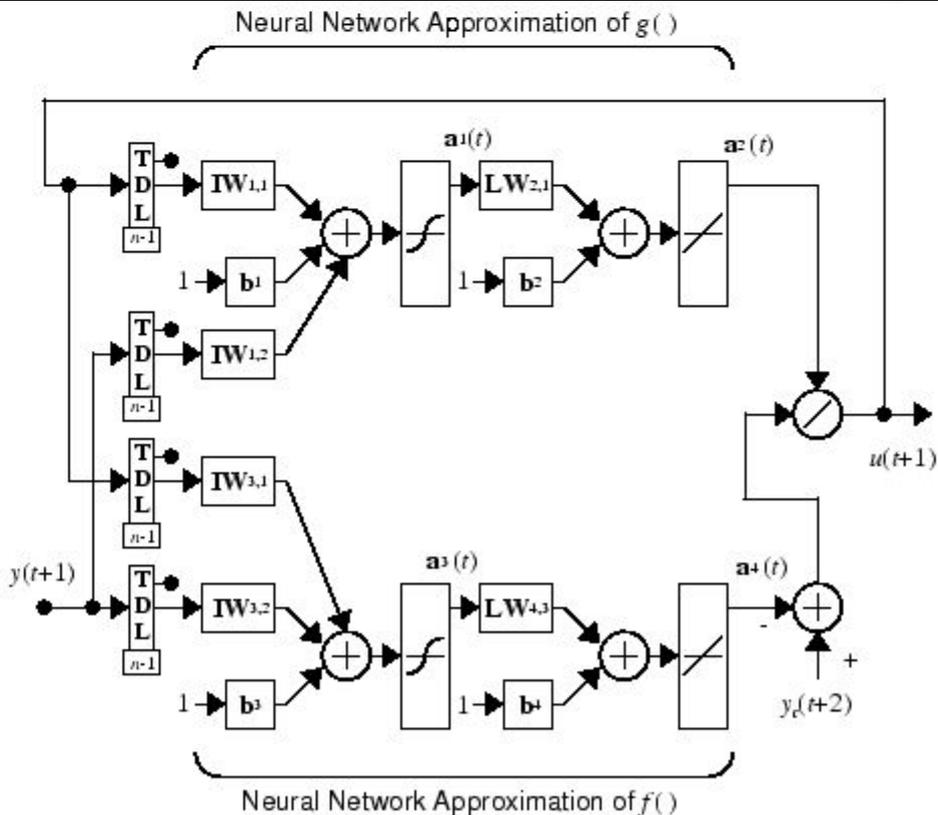
Если представить объект в виде:

$$\hat{y}(k+d) = f[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k-1), \dots, u(k-m+1)] + g[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k-1), \dots, u(k-m+1)] \cdot u(k)$$

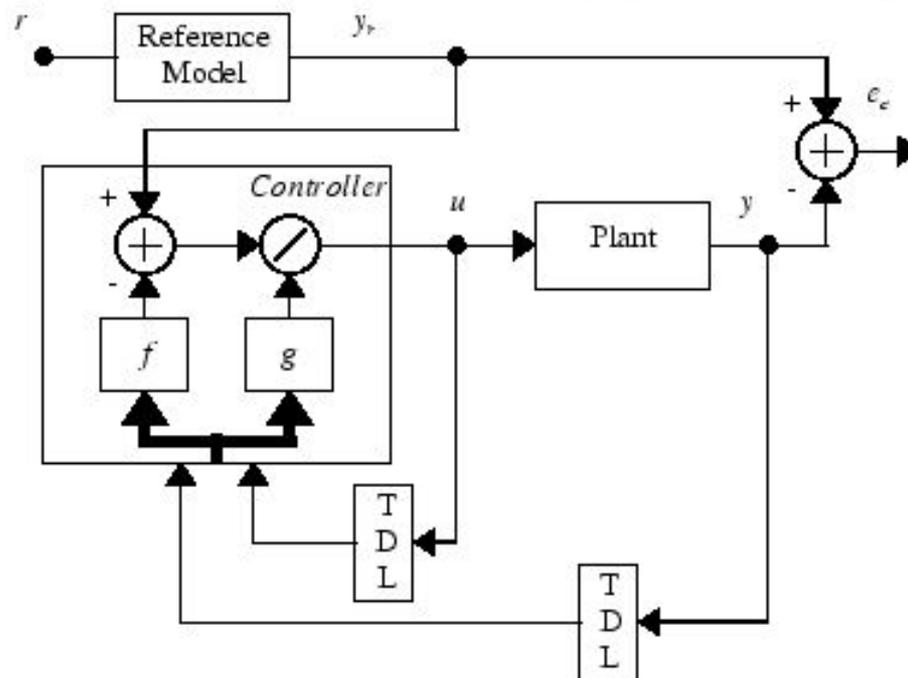
Тогда искомый закон управления:

$$u(k) = \frac{y_r(k+d) - f[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k-1), \dots, u(k-n+1)]}{g[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k-1), \dots, u(k-n+1)]}$$

Система с линеаризацией обратной связи



Структура нейронной сети

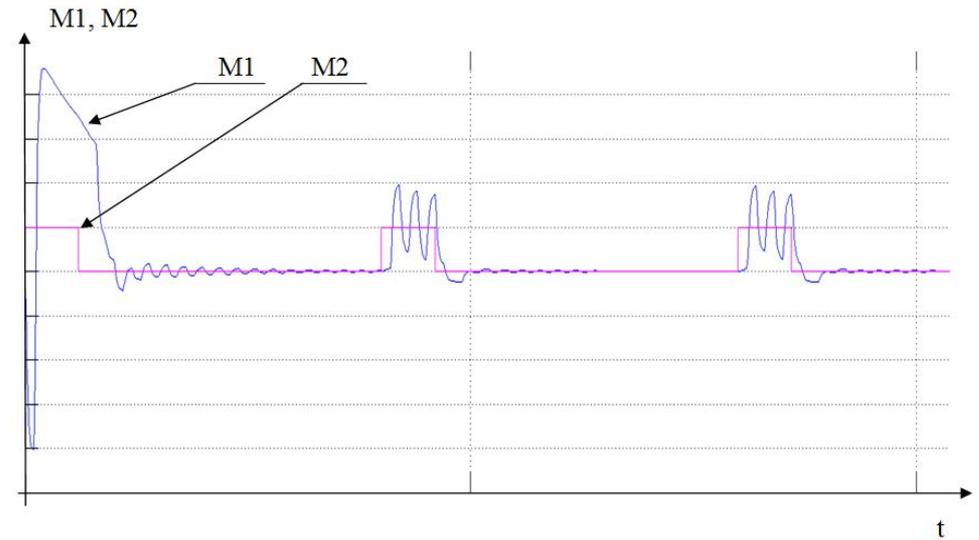
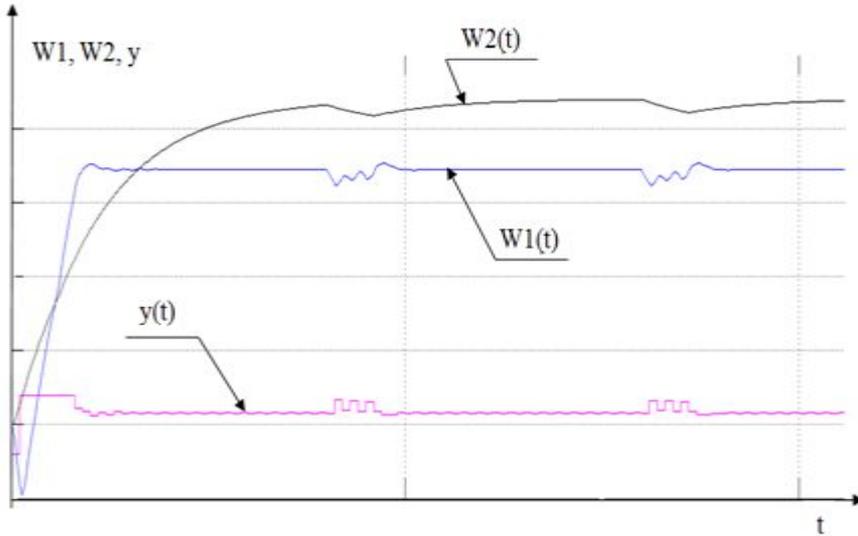


Общий вид системы регулирования



Результаты применения систем с линеаризацией обратной связи

Регулирование скорости АД



Система позиционного электропривода

