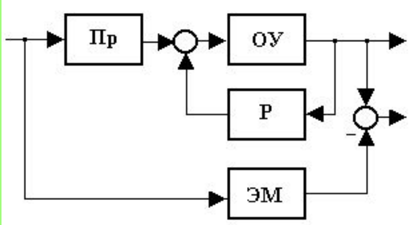
Компьютерная технология НАБЛЮДЕНИЕ

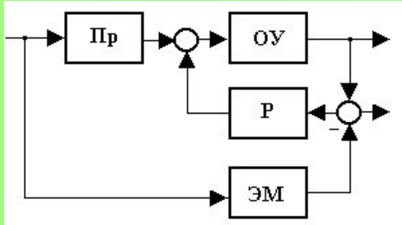
Моделирование	Управление	Наблюдение
Фильтрация	Идентификация	Диагностика
Адаптация	Оптимизация	Визуализация

Некоторые базовые структуры систем управления

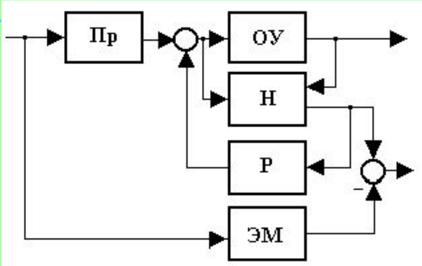
управление по координатам



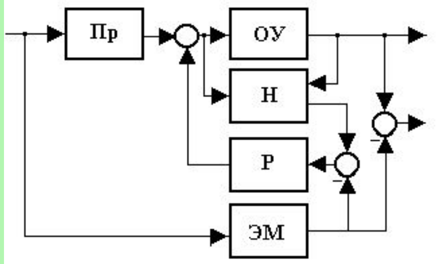
квазиадаптивное управление по координатам



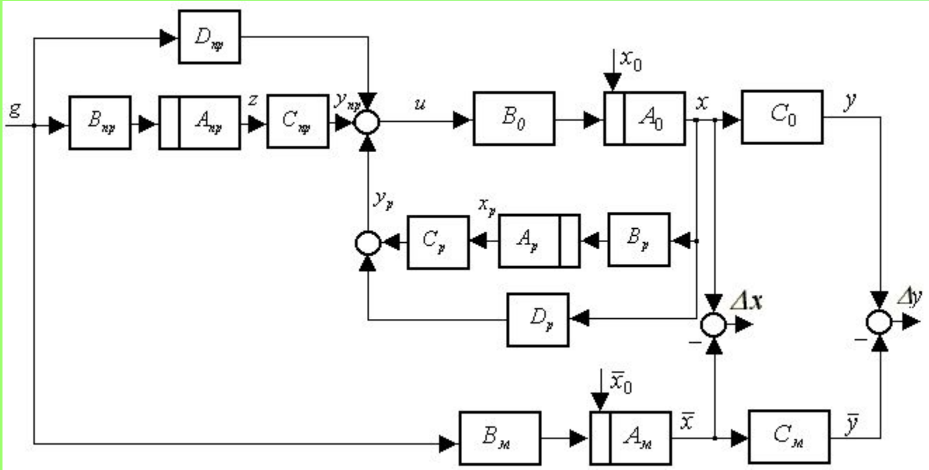
управление по оценкам координат



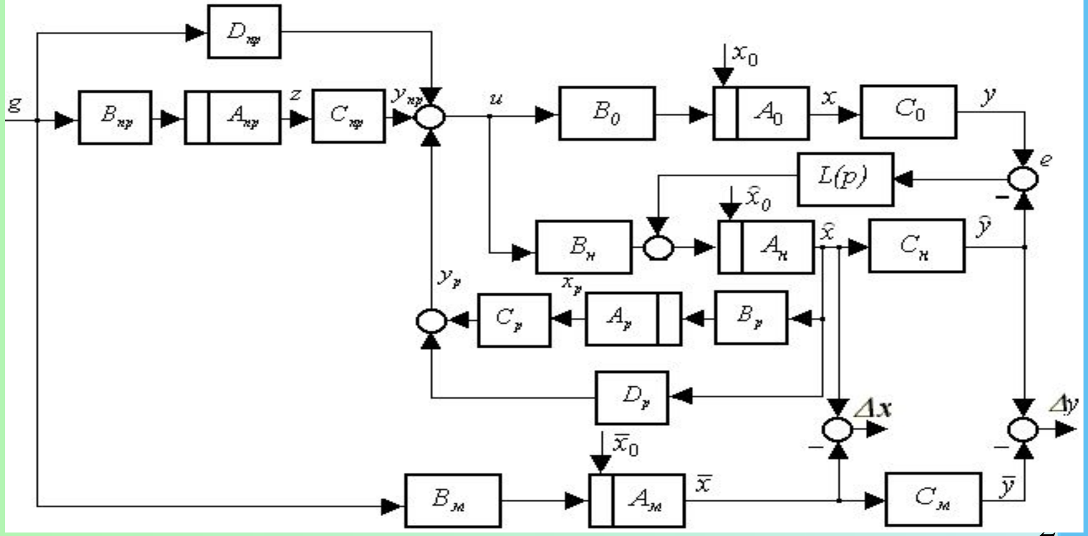
квазиадаптивное управление по оценкам координат



адаптивное управление с сигнальной настройкой (СН)



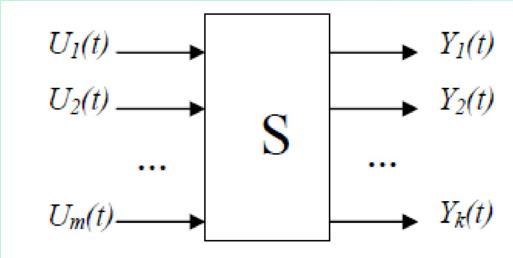
адаптивное управление с параметрической настройкой (ПН);



Наблюдатель состояния полного порядка

Идея

Пусть стационарный объект описывается традиционной системой уравнений



MIMO - системы

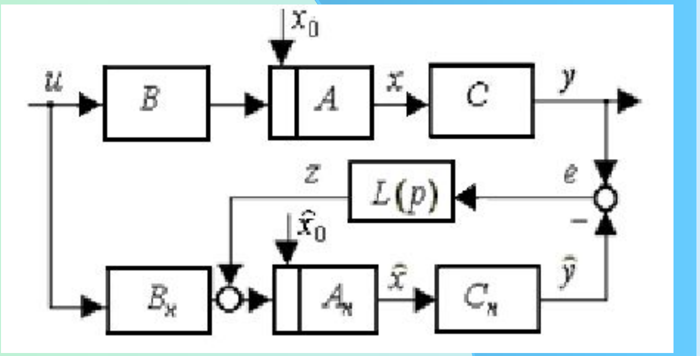
(1) $$\frac{d}{dt}X(t) = AX(t) + BU(t) \quad \text{при} \quad X(t_0) = x_0$$
$$Y(t) = CX(t) + DU(t)$$

Пусть матрицы A, B, C известны, тогда вектор x можно аппроксимировать состоянием $\hat{X}$ модели

Если начальные условия идентичны, то состояния X и $\hat{X}$ совпадают.

$$\frac{d}{dt}\hat{X}(t) = A\hat{X}(t) + BU(t) \qquad (2)$$

Если начальные условия для систем различны, то $\hat{X}$ сходится к X только тогда, когда исходная система асимптотически устойчива.

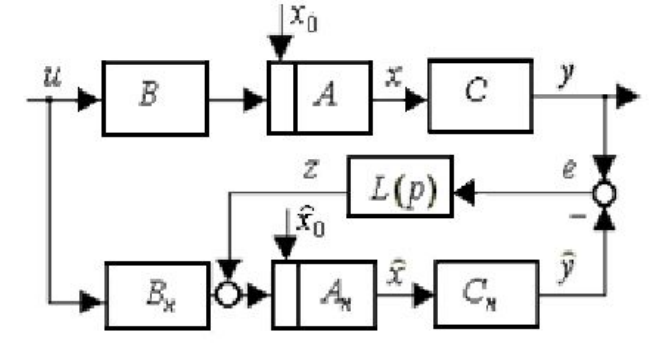


Качество восстановления улучшается, если ввести в модель разность измеренного выхода и его оценки выхода в виде обратной связи:

(3) $$\frac{d}{dt}\hat{X}(t) = A\hat{X}(t) + BU(t) + L\left(Y - C\hat{X}\right)$$

L - некоторая матрица, обеспечивающая требуемый вид переходных процессов оценки вектора состояния.

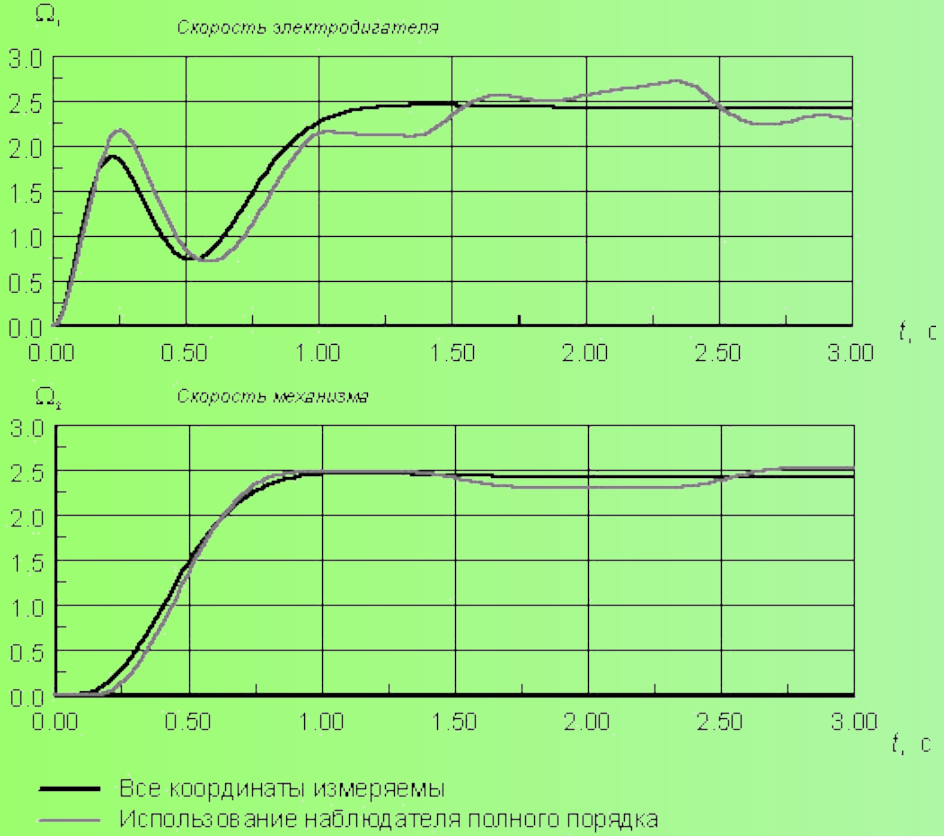
Введем ошибку оценки\восстановления $\tilde{X} = X - \hat{X}$



Вычитая (3) из уравнения (1), получим

$$\frac{d}{dt}\tilde{X} = \tilde{A}X - L\left(Y - C\hat{X}\right) = \tilde{A}X - LCX + LC\hat{X} = \tilde{A}X - LC\left(X - \hat{X}\right) = \left(A - LC\right)\tilde{X}$$

Очевидно, для того чтобы ошибка восстановления стремилась к нулю, необходимо выбрать матрицу L так, чтобы система была асимптотически устойчива.



$$\chi\left(p\right) = \det\left(pI_n - A + LC\right)$$

$$\Lambda = \left\{ \lambda_i ;\ \ \chi(\lambda_i) = 0 \right\}, \qquad i = \overline{1,n}$$

$$\operatorname{Re}\lambda_i < 0, \qquad i = \overline{1,n}$$

Наблюдатель нагрузки электромеханической системы (пример)

Рассматривается электромеханическая система с электродвигателем постоянного тока с независимым возбуждением.

Ставится задача определения (оценки) механической нагрузки ЭМС, приведенной к ротору электродвигателя

$$\begin{aligned} \dot{M}_m &= -\frac{R_я}{L_я} M_m - \frac{k_m k_l}{L_я}\omega + \frac{k_m k_l}{L_я} u \\ \dot{\omega} &= -\frac{d_1 + d_2}{J_1 + J_2}\omega + \frac{1}{J_1 + J_2}(M_m - M_c) \end{aligned} \qquad (1)$$

$$M_m = k_m I_я$$

Введем в рассмотрение расширенный вектор состояния объекта наблюдения $X = \begin{bmatrix} I \\ \omega \\ M_c \end{bmatrix}$

Положим $\dot{M}_c = \alpha M_c + \mu$ $\quad d_1 = 0 \quad d_2 = 0$

Тогда

(2) $$\frac{d}{dt}X = AX + BU \qquad X(t_0) = X_0 \qquad A = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & 0 \\ a_3 & 0 & a_4 \\ 0 & 0 & \alpha \end{bmatrix}, \qquad B = \begin{bmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & b_2 \end{bmatrix}, \qquad U = \begin{bmatrix} u \\ \mu \end{bmatrix}$$
$$Y = CX$$

(3) $$\frac{d}{dt}\tilde{X} = A\tilde{X} + BU + KC(X - \tilde{X})$$

Пусть $C = (1 \quad 0 \quad 0)$

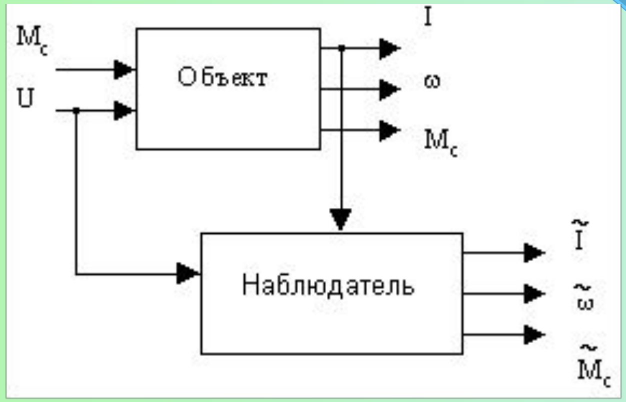


Рис. 1. Обобщенная блок-схема системы

(4) $$\frac{d}{dt}\begin{pmatrix} \tilde{I} \\ \tilde{\omega} \\ \tilde{M}_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 - k_1 & a_2 & 0 \\ a_3 - k_2 & 0 & a_4 \\ -k_3 & 0 & q \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \tilde{I} \\ \tilde{\omega} \\ \tilde{M}_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_1 & k_1 \\ 0 & k_2 \\ 0 & k_3 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} U \\ I \end{pmatrix}$$

Уравнения всей динамической системы в пространстве состояний

(5)
$$\frac{d}{dt}\begin{pmatrix} I \\ \omega \\ M_c \\ \tilde{I} \\ \tilde{\omega} \\ \tilde{M}_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_3 & 0 & a_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha & 0 & 0 & 0 \\ k_1 & 0 & 0 & a_1-k_1 & a_2 & 0 \\ k_2 & 0 & 0 & a_3-k_2 & 0 & a_4 \\ k_3 & 0 & 0 & -k_3 & 0 & q \end{pmatrix}\begin{pmatrix} I \\ \omega \\ M_c \\ \tilde{I} \\ \tilde{\omega} \\ \tilde{M}_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ b_1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} U \\ M_c \end{pmatrix}$$

$$Y = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} I & \omega & M_c & \tilde{I} & \tilde{\omega} & \tilde{M}_c \end{pmatrix}^T$$

Матричную передаточную функцию $\Phi(p) = C\,(p\,E - A)^{-1}B$ динамической системы (5) можно представить в виде

$$\Phi(p) = \begin{pmatrix} \dots & \dots. \\ \dots & \dots \\ 0 & \Phi_{32}(p) \end{pmatrix} \qquad (6) \qquad \Phi_{32}(p) = \frac{a_2 a_4 k_3}{(p-\alpha)\;Z(p)}$$

и представляет собой передаточную функцию всей обобщенной динамической системы по каналу $M_c - \tilde{M}_c$

$$Z(p) = p^3 + (-q - a_1 + k_1)p^2 + (-a_2 a_3 + a_2 k_2 - k_1 q + a_1 q)p + a_2 a_4 k_3 + a_2 a_3 q - a_2 k_2 q$$

Из модели (2) следует, что подсистема "объект" по сигналу M_c является ***статической*** и ее поведение описывается в (6) составляющей $\frac{1}{p-\alpha}$

Подсистема "наблюдатель", описываемая оставшейся частью (6), будет ***астатической*** в случае, если принять $q = 0$

В этом случае передаточная функция канала $M_c - \tilde{M}_c$ подсистемы "наблюдатель" принимает вид

$$W^{н}_{MM}(p) = \frac{a_2 a_4 k_3}{p^3 + (-a_1 + k_1)p^2 + (-a_2 a_3 + a_2 k_2)p + a_2 a_4 k_3}$$

Передаточная функция по ошибке в этом случае имеет вид

$$W_{\varepsilon}(p) = 1 - W^{н}_{MM}(p) = \frac{p(p^2 + (-a_1 + k_1)p + (-a_2 a_3 + a_2 k_2))}{p^3 + (-a_1 + k_1)p^2 + (-a_2 a_3 + a_2 k_2)p + a_2 a_4 k_3}$$

Отсюда - коэффициент ошибки C_0, вычисляемый для канала $M_c - \tilde{M}_c$ равен нулю, т.е. этот канал подсистемы становится ***астатическим***.

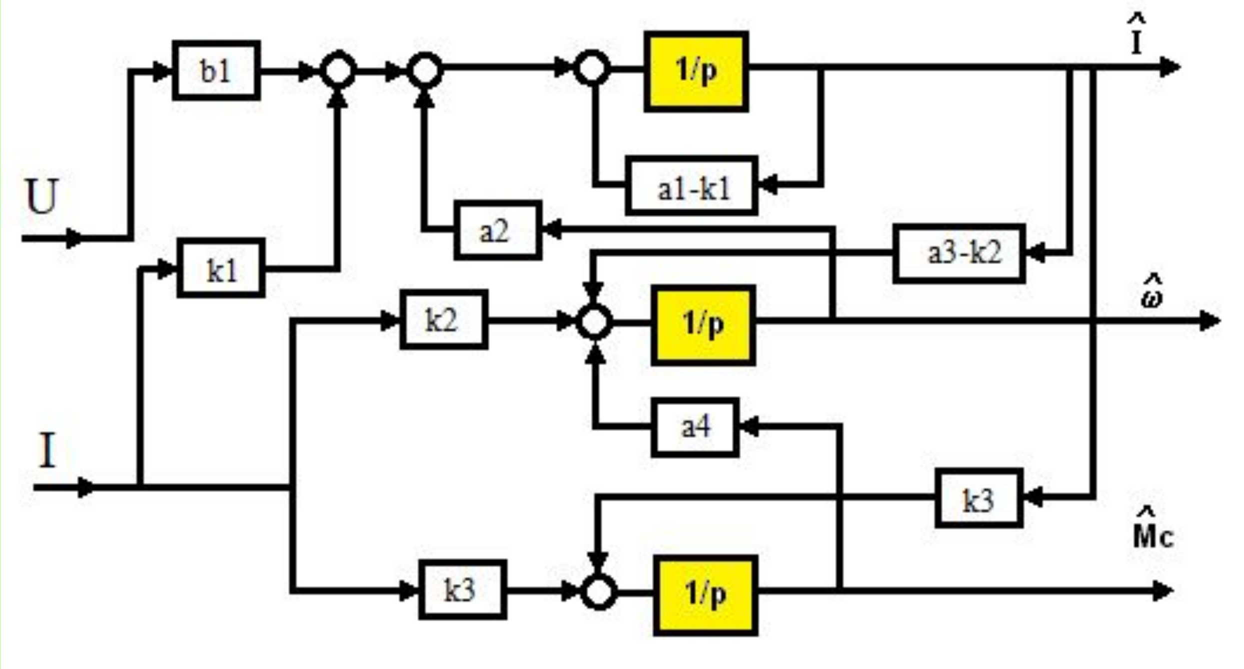
Характеристический полином наблюдателя приобретает следующий вид

$$Z(p) = p^3 + (-a_1 + k_1)p^2 + (-a_2 a_3 + a_2 k_2)p + a_2 a_4 k_3$$

Исходя из условий требуемой динамики, можно определить элементы матрицы коэффициентов наблюдателя

$$k_1 = a_1 + \beta_2, \qquad k_2 = \frac{1}{a_2}(a_2 a_3 + \beta_1), \qquad k_3 = \frac{1}{a_2 a_4}\beta_0$$

где $\beta_2,\ \beta_1,\ \beta_0$ - суть коэффициенты характеристического полинома третьего порядка, соответствующие желаемой динамике наблюдателя.



Математическая модель наблюдателя

При непосредственном измерении угловой скорости ω матрица C имеет вид $C = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$

В этом случае математическая модель наблюдателя (3) приобретает вид:

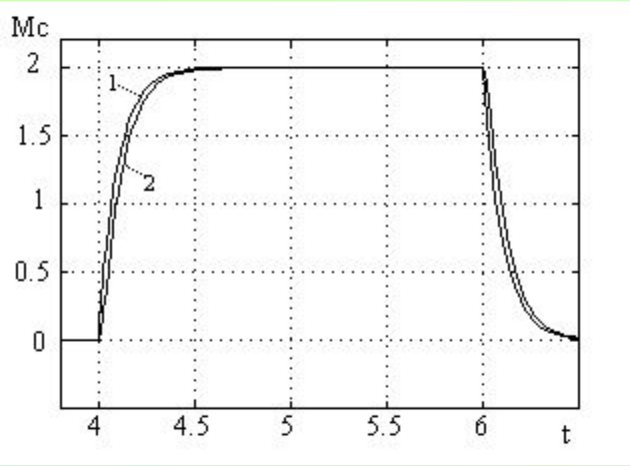
$$\frac{d}{dt}\begin{pmatrix} \tilde{I} \\ \tilde{\omega} \\ \tilde{M}_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 - k_1 & 0 \\ a_3 & -k_2 & a_4 \\ 0 & -k_3 & q \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \tilde{I} \\ \tilde{\omega} \\ \tilde{M}_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_1 & k_1 \\ 0 & k_2 \\ 0 & k_3 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} U \\ \omega \end{pmatrix}$$

В этого варианта настроечные коэффициенты наблюдателя имеют вид

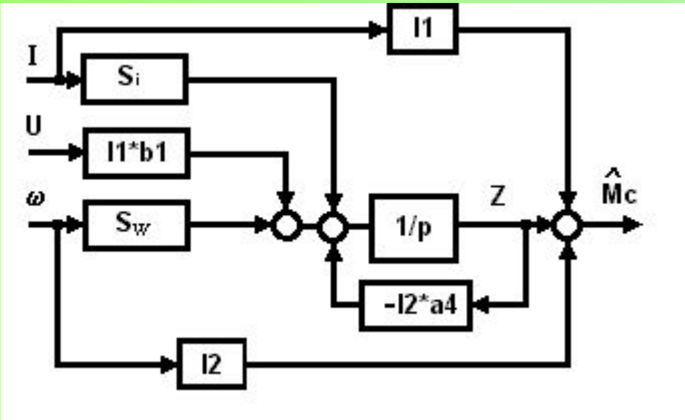
$$k_3 = -\frac{1}{a_1 a_4}\beta_0, \quad k_2 = a_1 + \beta_2, \quad k_1 = (\beta_1 + a_2 a_3 + a_1 k_2 - a_4 k_3)/a_3 \qquad (16)$$

При использовании измеренных значений тока статора и угловой скорости, т.е. при $C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$

$$\frac{d}{dt}\begin{pmatrix} \tilde{I} \\ \tilde{\omega} \\ \tilde{M}_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 - k_{11} & a_2 - k_{12} & 0 \\ a_3 - k_{21} & -k_{22} & a_4 \\ -k_{31} & -k_{32} & q \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \tilde{I} \\ \tilde{\omega} \\ \tilde{M}_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_1 & k_{11} & k_{12} \\ 0 & k_{21} & k_{22} \\ 0 & k_{31} & k_{32} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} U \\ I \\ \omega \end{pmatrix}$$



статья «Астатические наблюдатели нагрузки электромеханической системы», ж. Электричество, 2004. № 2. С. 25.



статья «Синтез наблюдателя нагрузки электромеханической системы»
ж. Изв. вузов. Авиационная техника. 2003. №2

Дополнительная литература

1. Андреев Ю.Н. Управление линейными конечномерными объектами. // М.: Наука. Физматлит. 1976.
2. Коровин С.К., Фомичев В.В. Наблюдатели состояния для линейных систем с неопределенностью. Москва. Физматлит. 2007. 223 с.
3. O'Reilly J. Observers for linear systems. // Academic Press. London. 1983.