

# ЦИФРОВОЙ НАБЛЮДАТЕЛЬ СОСТОЯНИЯ ДВУХМАССОВОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

Коцегуб П.Х., Толочко О.И., Федоряк Р.В.

Донецкий государственный технический университет

rf@abc.donbass.com

*This article describes the way of digital state observer synthesis according to the doublemass electromechanical object. It is shown, that using of digital observer even in analog control system helps us increase the quality of regulation and quick-action. This work also provide an analysis of digital observer's behavior on different discretization periods.*

Одной из основных проблем, возникающих при построении системы управления скоростью многомассовых систем вообще и двухмассового электромеханического объекта (ДЭМО) в частности является сложность получения достоверной информации о его координатах, к которым относится упругий момент и скорость второй массы. Связано это со сложностью реализации и практической эксплуатации датчиков – например, упругого момента. Между тем без введения в систему управления сигналов, пропорциональных данным координатам очень трудно добиться от неё высоких показателей с точки зрения качества управления и быстродействия. Известно, что применение наблюдателей состояния (НС) для восстановления не измеряемых координат объекта позволяет решить эту проблему. Вопросы синтеза аналоговых НС таких систем достаточно полно освещены в литературе [1], [2]. Однако выполнение НС в аналоговом виде усложняет поставленную задачу, т.к. возникают дополнительные проблемы помехозащищенности, нестабильности параметров операционных усилителей, а также необходимость масштабирования переменных (привязки их к уровням питающего напряжения). Масштабирование приводит к снижению уровней полезных сигналов в наблюдающем устройстве при работе в установленном режиме в десятки и сотни раз. Подобных недостатков лишены цифровые НС (ЦНС), поэтому даже в системах автоматического управления (САУ) с аналоговыми регуляторами их применение целесообразно и оправдано.

В настоящее время известно несколько способов синтеза ЦНС [2]. К ним относятся, прежде всего, способ построения ЦНС по дискретному описанию объекта управления и подстановочный способ. Последний достаточно подробно освещен в [2]. Рассмотрим синтез ЦНС по дискретному векторно – матричному описанию объекта.

Объектом управления является двухмассовая электромеханическая система, структурная схема которой без учета влияния вязкого трения и момента холостого хода двигателя приведена на рис. 1. Все параметры приведены в относительных единицах. За базовое значение постоянных времени примем постоянную времени вентильного преобразователя  $T_{\mu}$ , базовое значение скорости – скорость идеального холостого хода, базовые момент и ток – момент и ток короткого замыкания. На рисунке обозначены:  $M$  – момент двигателя;  $M_y$  – упругий момент;  $M_c$  – момент статического сопротивления;  $T_{m1}$ ,  $T_{m2}$  – механические постоянные времени первой и второй масс;  $T_{c12}$  – постоянная времени жесткости кинематической связи.

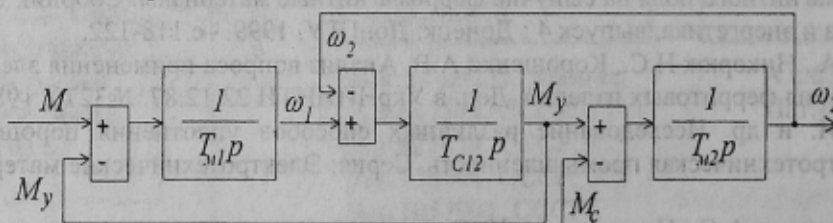


Рисунок 1 - Структурная схема ДЭМС.

В [2] приведен синтез ЦНС минимально возможного (второго) порядка. В качестве входного сигнала в нем используется скорость двигателя, а контроль выполняется по скорости механизма (второй массы). Пример практической реализации такого ЦНС с применением системы МАТЛАБ рассмотрен в [3].

Поскольку скорость механизма в промышленных условиях очень редко бывает доступной для измерения, целесообразно выполнить синтез ЦНС третьего порядка со входом по току якоря и контролем по скорости первой массы (двигателя).

Структурная схема “аналогового прототипа” синтезируемого ЦНС приведена на рис. 2.

Векторно – матричное описание такого НС имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu}; \\ \mathbf{y} &= \mathbf{Cx}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где

- вектор переменных состояния объекта  $\mathbf{x} = [\omega_1 \quad M_y \quad \omega_2]^T$ ;

- вектор управляющих воздействий  $\mathbf{u} = [I \quad 0 \quad 0]^T$ ;

- матрица состояния  $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{T_{M1}} & 0 \\ \frac{1}{T_{C12}} & 0 & -\frac{1}{T_{C12}} \\ 0 & \frac{1}{T_{M2}} & 0 \end{bmatrix}$ ;

- матрица управления  $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_{M1}} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$ ;

- матрица выхода  $\mathbf{C} = [1 \quad 0 \quad 0]$

- матрица корректирующих коэффициентов НС  $\mathbf{L} = [l_1 \quad l_2 \quad l_3]^T$ .

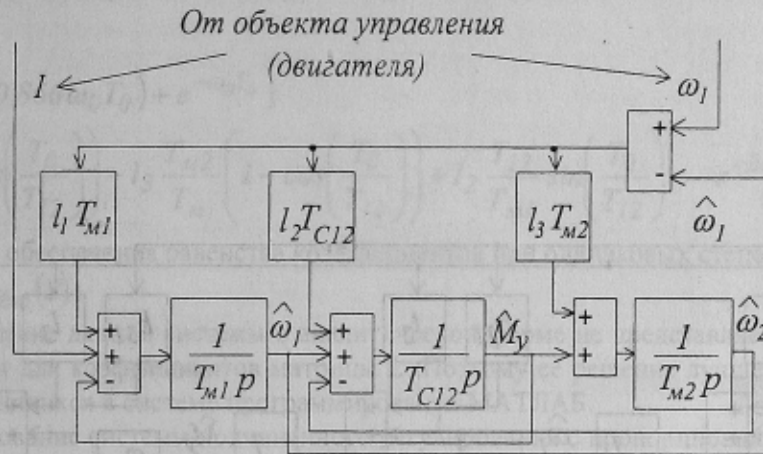


Рисунок 2 - Аналоговый наблюдатель состояния ДЭМС.

Переход к дискретному описанию производится по известной методике [4]. Дискретная матрица состояния принимает вид

$$\mathbf{A}_d = L^{-1} \{ (pI - \mathbf{A})^{-1} \} = \Phi(T_0) = \begin{bmatrix} \varphi_{11}(T_0) & \varphi_{12}(T_0) & \varphi_{13}(T_0) \\ \varphi_{21}(T_0) & \varphi_{22}(T_0) & \varphi_{23}(T_0) \\ \varphi_{31}(T_0) & \varphi_{32}(T_0) & \varphi_{33}(T_0) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $I$  – единичная матрица размером  $3 \times 3$ ,

$\mathbf{A}$  – матрица состояния непрерывного объекта,

$T_0$  – период дискретности цифрового наблюдателя.

Коэффициенты дискретной матрицы состояния определяются из следующих выражений:

$$\begin{aligned} \varphi_{11}(T_0) &= \frac{T_{M1} + T_{M2} \cos\left(\frac{T_0}{T_{12}}\right)}{T_M}; & \varphi_{12}(T_0) &= -\frac{T_{12}}{T_{M1}} \left( \sin\left(\frac{T_0}{T_{12}}\right) \right); & \varphi_{13}(T_0) &= \frac{T_{M2} \left( 1 - \cos\left(\frac{T_0}{T_{12}}\right) \right)}{T_M}; \\ \varphi_{21}(T_0) &= \frac{T_{M1} T_{M2} \sin\left(\frac{T_0}{T_{12}}\right)}{T_M T_{12}}; & \varphi_{22}(T_0) &= \cos\left(\frac{T_0}{T_{12}}\right); & \varphi_{23}(T_0) &= -\frac{T_{M1} T_{M2} \sin\left(\frac{T_0}{T_{12}}\right)}{T_M T_{12}}; \\ \varphi_{31}(T_0) &= \frac{T_{M1} \left( 1 - \cos\left(\frac{T_0}{T_{12}}\right) \right)}{T_M}; & \varphi_{32}(T_0) &= \frac{T_{M1} T_{C12} \sin\left(\frac{T_0}{T_{12}}\right)}{T_M T_{12}}; & \varphi_{33}(T_0) &= \frac{T_{M2} + T_{M1} \cos\left(\frac{T_0}{T_{12}}\right)}{T_M}. \end{aligned} \quad (3)$$

где  $T_{12} = \sqrt{\frac{T_{M1}T_{M2}T_{c12}}{T_{M1} + T_{M2}}}$  - постоянная времени упругих колебаний двухмассовой системы.

Дискретная матрица управления имеет вид

$$\mathbf{B}_d = \mathbf{B} \int_0^{T_0} \Phi(\tau) d\tau = [b_{11} \quad b_{21} \quad b_{31}]^T, \quad (4)$$

где

$$b_{11} = \frac{T_0}{T_M} + \frac{T_{M2} \sin\left(\frac{T_0}{T_{12}}\right)}{T_M T_{M1} \frac{1}{T_{12}}}; \quad b_{21} = \frac{T_{M2} \left(1 - \cos\left(\frac{T_0}{T_{12}}\right)\right)}{T_M}; \quad b_{31} = \frac{T_0 - T_{12} \sin\left(\frac{T_0}{T_{12}}\right)}{T_M}. \quad (5)$$

Матрица выхода  $\mathbf{C}$  не отличается от таковой для непрерывного объекта.

Структурная схема ЦНС, соответствующая дискретному векторно – матричному описанию объекта

$$\mathbf{x}(nT + 1T) = \mathbf{A}_d \mathbf{x}(nT) + \mathbf{B}_d \mathbf{u}(nT), \quad (6)$$

приведена на рис. 3.

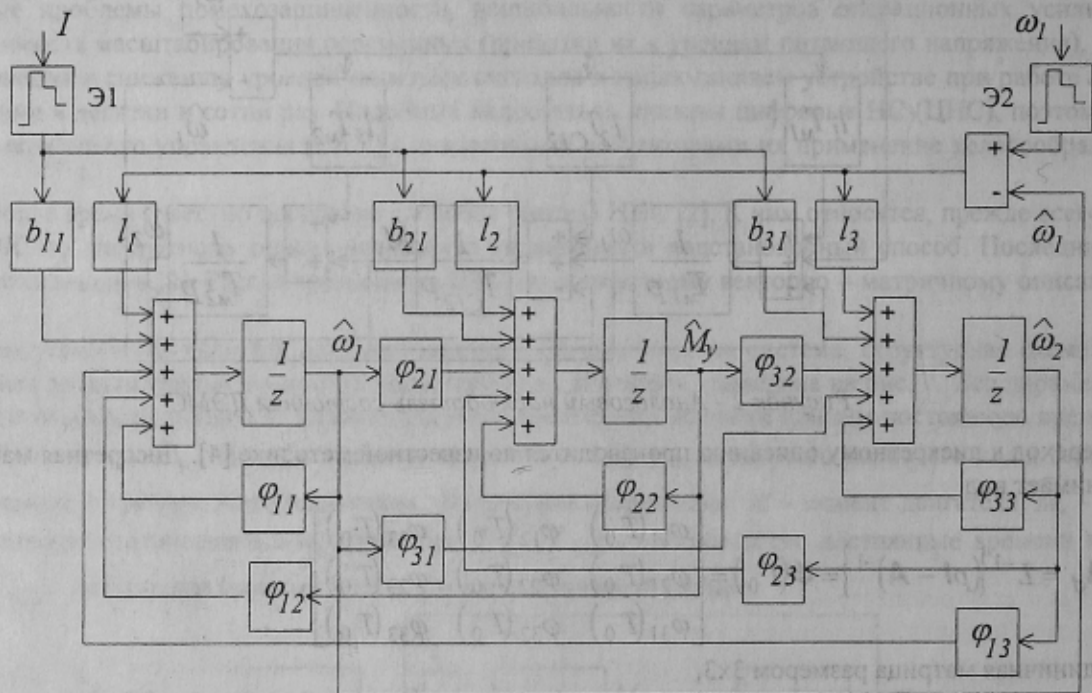


Рисунок 3 – Структурная схема цифрового наблюдателя состояния

В верхней части рисунка показано, что сигналы тока и скорости двигателя пропускаются через экстраполяторы нулевого порядка с фиксацией на период (блоки Э1 и Э2).

Характеристический полином дискретного наблюдателя имеет вид:

$$\begin{aligned} H_d(z) &= \det(z\mathbf{I} - \mathbf{A}_d + \mathbf{LC}) = \\ &= z^3 + \left( l_1 - 2 \cos\left(\frac{T_0}{T_{12}}\right) - 1 \right) z^2 + \\ &+ \left( 1 + 2 \cos\left(\frac{T_0}{T_{12}}\right) + l_3 \frac{T_{M2}}{T_M} \left( 1 - \cos\left(\frac{T_0}{T_{12}}\right) \right) - l_2 \frac{T_{12}}{T_{M1}} \sin\left(\frac{T_0}{T_{12}}\right) - l_1 \frac{T_{M2} + (T_M + T_{M1}) \cos\left(\frac{T_0}{T_{12}}\right)}{T_M} \right) z + \\ &+ l_1 \left( \frac{T_{M1}}{T_M} + \frac{T_{M2}}{T_M} \cos\left(\frac{T_0}{T_{12}}\right) \right) + l_3 \frac{T_{M2}}{T_M} \left( 1 - \cos\left(\frac{T_0}{T_{12}}\right) \right) + l_2 \frac{T_{12}}{T_{M1}} \sin\left(\frac{T_0}{T_{12}}\right) - 1. \end{aligned} \quad (7)$$



Для нахождения коэффициентов матрицы корректирующих связей ЦНС этому полиному нужно поставить в соответствие полином того же порядка, отвечающий одному из стандартных распределений корней. Обычно в инженерной практике пользуются распределением корней по Баттерворту. Дискретная аппроксимация стандартной формы Баттерворта третьего порядка имеет вид:

$$H_{dxc}(z) = z^3 - \left( e^{-\omega_{0n}T_0} + 2e^{-0,5\omega_{0n}T_0} \cos(0,866\omega_{0n}T_0) \right) z^2 + \left( 2e^{-1,5\omega_{0n}T_0} \cos(0,866\omega_{0n}T_0) + e^{-\omega_{0n}T_0} \right) z - e^{-2\omega_{0n}T_0}. \quad (8)$$

Здесь  $\omega_{0n}$  - среднегеометрический корень характеристического уравнений непрерывного прототипа синтезируемого цифрового наблюдателя.

Значения коэффициентов матрицы обратных связей ЦНС определяются из следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} \left( l_1 - 2 \cos\left(\frac{T_0}{T_{12}}\right) - 1 \right) = - \left( e^{-\omega_0 T_0} + 2e^{-0,5\omega_0 T_0} \cos(0,866\omega_0 T_0) \right); \\ \left( 1 + 2 \cos\left(\frac{T_0}{T_{12}}\right) + l_3 \frac{T_{m2}}{T_m} \left( 1 - \cos\left(\frac{T_0}{T_{12}}\right) \right) - l_2 \frac{T_{12}}{T_{m1}} \sin\left(\frac{T_0}{T_{12}}\right) - l_1 \frac{T_{m2} + (T_m + T_{m1}) \cos\left(\frac{T_0}{T_{12}}\right)}{T_m} \right) = \\ = \left( 2e^{-1,5\omega_0 T_0} \cos(0,866\omega_0 T_0) + e^{-\omega_0 T_0} \right); \\ l_1 \left( \frac{T_{m1}}{T_m} + \frac{T_{m2}}{T_m} \cos\left(\frac{T_0}{T_{12}}\right) \right) + l_3 \frac{T_{m2}}{T_m} \left( 1 - \cos\left(\frac{T_0}{T_{12}}\right) \right) + l_2 \frac{T_{12}}{T_{m1}} \sin\left(\frac{T_0}{T_{12}}\right) = -e^{-2\omega_0 T_0}, \end{cases} \quad (9)$$

полученной в результате обеспечения равенства коэффициентов при одинаковых степенях  $z$  характеристических полиномов  $H_d(z)$  и  $H_{dxc}(z)$ .

Отметим, что решение данной системы в аналитической форме не представляет особых затруднений, но дает сложные выражения для коэффициентов матрицы  $L$ . Поэтому ее решение лучше осуществить с помощью численных методов, имеющихся в системе программирования МАТЛАБ.

Выполним исследование системы подчиненного регулирования с пропорциональным регулятором скорости и корректирующей связью по разности скоростей первой и второй массы. Такая система приведена и исследована в [5] в предположении, что обе скорости доступны измерению. Здесь же сигнал разности скоростей формировался при помощи синтезированного ЦНС. Моделирование проводилось при следующих параметрах объекта управления:  $T_\mu = 0,005$  с;  $T_{12} = 10T_\mu$ ;  $T_{m1} = T_{m2} = 7,5T_\mu$ . На рис. 4 приведены зависимости коэффициентов корректирующих связей наблюдателя от периода дискретности, полученные при тех же параметрах объекта.

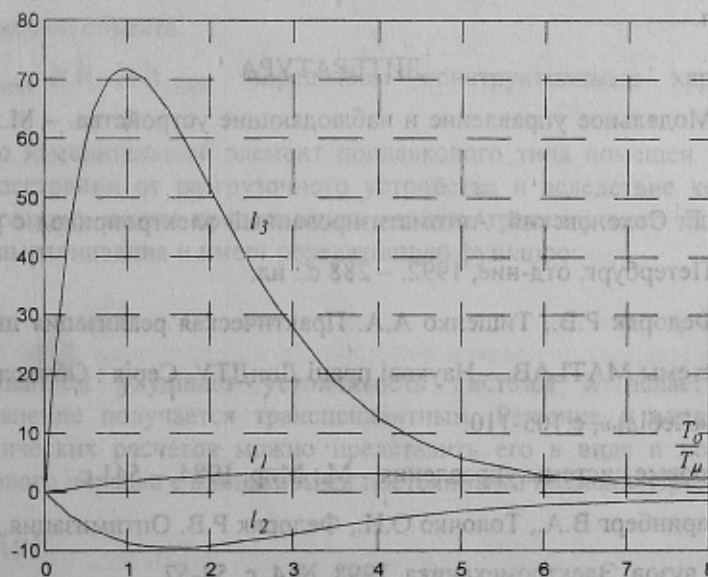


Рисунок 4 - Зависимость коэффициентов наблюдателя от периода дискретности при  $\omega_{0n} = 1/T_\mu$ .

Переходные процессы в системе, снабженной ЦНС при малых периодах дискретности ( $T_0 < 0,5T_\mu$ ) приведены на рис. 5. Они носят удовлетворительный характер и по качеству практически не отличаются от таковых в системе с непрерывным НС. При увеличении же периода дискретности выше приведенного уровня система может стать неустойчивой. Увеличить допустимый по условиям устойчивости диапазон периода квантования удается за счет снижения собственной частоты НС (снижения его быстродействия). Например, снижение  $\omega_{0н}$  в два раза до величины  $\frac{0,5}{T_\mu}$  позволяет безопасно увеличить границы диапазона допустимого периода дискретности в несколько раз. Правда, такое снижение частоты увеличивает статические ошибки восстановления скоростей и упругого момента, а следовательно, и влияние данного НС на статические свойства основной системы.

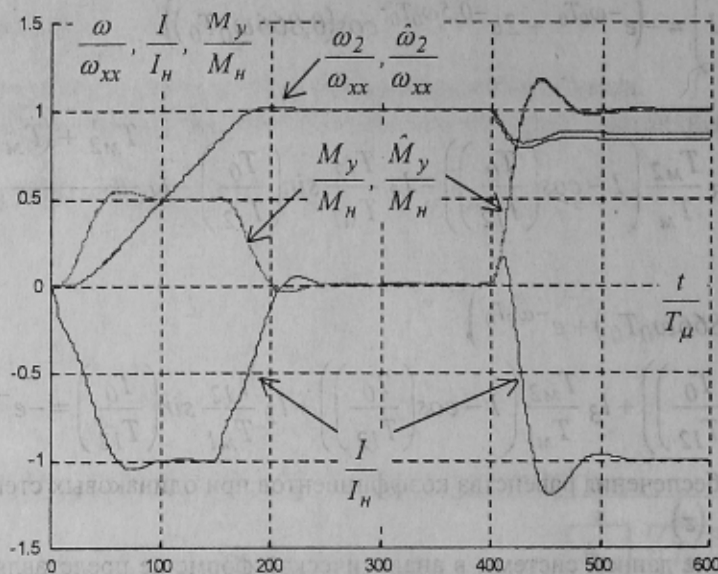


Рисунок 5 – Переходные процессы при  $T_0 = 0,2T_\mu$  и  $\omega_{0н} = \frac{1}{T_\mu}$ .

#### ВЫВОДЫ

1. Синтезирован цифровой наблюдатель состояния двухмассового электромеханического объекта со входом по току и контролем по скорости первой массы.
2. Показано, что применение наблюдателя состояния обеспечивает удовлетворительное качество переходных процессов в системе подчиненного регулирования с коррекцией по разности скоростей.
3. Следует продолжить исследования по выявлению оптимальных периодов дискретности цифрового наблюдателя состояния.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Н.Т. Кузовков. Модальное управление и наблюдающие устройства. – М.: Машиностроение, 1976. – 184 с.
2. Ю.А. Борцов, Г.Г. Соколовский. Автоматизированный электропривод с упругими связями. – СПб.: Энергоатомиздат. Санкт – Петербург. отд-ние, 1992. – 288 с.: ил.
3. Толочко О.И., Федоряк Р.В., Тищенко А.А. Практическая реализация цифровых наблюдателей состояния с применением системы MATLAB. – Наукові праці ДонДТУ. Серія : Обчислювальна техніка та автоматизація, вип.12: - Донецьк, «Лебідь», с.105-110.
4. Изерман Р. Цифровые системы управления. – М.: Мир, 1984. – 541 с.
5. Коцегуб П.Х., Баринберг В.А., Толочко О.И., Федоряк Р.В. Оптимизация двухмассовых систем регулирования скорости. – Изв. вузов. Электромеханика. 1998, № 4, с. 54-57.