

Отсюда

$$C = I_H \sin\varphi / (2\pi f U).$$

Подставив в последнюю формулу  $U = 220\text{В}$ ,  $f = 50\text{Гц}$ , получим финальную формулу для расчёта компенсирующей ёмкости

$$C = 15 I_H \sin\varphi. \quad (4)$$

### **Вывод**

Построение компенсатора на аналоговых элементах для выполнения основных функций преобразования сигналов позволяет создать модель в понятиях теории автоматического управления (ТАУ). Рассмотрение модели как системы автоматического управления позволяет исследовать параметры компенсатора методами ТАУ с использованием компьютерных средств моделирования, например, Matlab с ControlSystemToolbox и Simulink. Использование компенсатора реактивной мощности является целесообразным и актуальным.

### **Список цитированных источников**

1. Кабышев, А. В. Компенсация реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий: учебное пособие / А. В. Кабышев. Томск: издательство Томского политехнического университета, 2012. – 234 с.
2. Ярошевич, А. В. Схема компенсации реактивной мощности в квартирных электрических сетях / А. В. Ярошевич // Вестник Брестского государственного технического университета. – Брест : БрГТУ. – 2011. – № 5 (71): Физика, математика, информатика. – С.66–67.
3. Регулятор реактивной мощности с аналоговым вычислителем. Рэспубліка Беларусь / ПАТЭНТ на карыснуюмадэль № 8066 / Аутар Ярошевич А. В. / Зарэгістравана у Дзяржауным рээстры карысных мадэляу 2011.12.15.

УДК 681.5

*Терещук Г. В.*

*Научный руководитель: к. т. н., доцент Прокопеня О. Н.*

## **ОСОБЕННОСТИ ЦИФРОВОЙ РЕАЛИЗАЦИИ НАБЛЮДАТЕЛЯ СОСТОЯНИЯ**

Использование наблюдателя состояния позволяет существенно уменьшить количество измерительных устройств при построении системы регулирования [1. 2]. Это особенно актуально, если система имеет высокий порядок. При построении системы позиционного управления на основе двигателя постоянного тока требуется датчик положения, датчик угловой скорости и датчик тока двигателя. При использовании наблюдателя требуется только датчик положения, что существенно упрощает привод.

Однако, вследствие того, что постоянные времени двигателя постоянного тока очень малы (сотые доли секунды), можно предположить, что при цифровой реализации наблюдателя потребуется очень малое время дискретизации (период квантования). Это, в свою очередь, потребует высокого быстродействия вычислительного устройства, на котором реализуется наблюдатель. Таким образом, возникает задача определения требований по быстродействию к программируемому контроллеру при построении привода постоянного тока с

наблюдателем состояния. Данный вопрос требует дополнительного исследования прежде всего методами математического моделирования. Для этого требуется дискретная модель наблюдателя состояния, которая может быть реализована в виде программы для контроллера.

Уравнения состояния привода с учетом силового преобразователя и редуктора

$$\begin{aligned}\dot{\alpha} &= k_p \omega; \\ J_p \cdot \dot{\omega} &= c_m \cdot I_{\text{я}}; \\ L_{\text{я}} \cdot \dot{I}_{\text{я}} + (R_{\text{я}} + R_{\text{дп}}) \cdot I_{\text{я}} + c_e \cdot \omega &= k_y U_{\text{я}},\end{aligned}$$

где  $\alpha$  – угол поворота выходного звена;

$\omega$  – угловая скорость двигателя;

$I_{\text{я}}$  – ток якоря двигателя;

$J_p$  – момент инерции ротора;

$L_{\text{я}}$  – индуктивность обмотки якоря;

$R_{\text{я}}$  и  $R_{\text{дп}}$  – сопротивление обмотки якоря и обмотки дополнительных полюсов;

$k_p$  и  $k_y$  – коэффициенты передачи редуктора и силового преобразователя (усилителя).

$c_e$  и  $c_m$  – постоянные двигателя.

Данным уравнениям соответствуют матрицы

$$A = \begin{bmatrix} 0 & k_p & 0 \\ 0 & 0 & \frac{c_m}{J_p} \\ 0 & -\frac{c_e}{L_{\text{я}}} & -\frac{R_{\text{я}}}{L_{\text{я}}} \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{k_y}{L_{\text{я}}} \end{bmatrix}; \quad C = [1 \ 0 \ 0]; \quad D = [0].$$

Уравнение наблюдателя в матричной форме

$$\dot{\bar{X}} = F\bar{X} + BU + Gy,$$

где

$$\begin{aligned}F = A - GC &= \begin{bmatrix} 0 & k_p & 0 \\ 0 & 0 & \frac{c_m}{J_p} \\ 0 & -\frac{c_e}{L_{\text{я}}} & -\frac{R_{\text{я}} + R_{\text{д.п.}}}{L_{\text{я}}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{bmatrix} [1 \ 0 \ 0], \\ &= \begin{bmatrix} -g_1 & k_p & 0 \\ -g_2 & 0 & \frac{c_m}{J_p} \\ -g_3 & -\frac{c_e}{L_{\text{я}}} & -\frac{R_{\text{я}} + R_{\text{д.п.}}}{L_{\text{я}}} \end{bmatrix}\end{aligned}$$

В развернутом виде уравнения состояния наблюдателя

$$\dot{\bar{\alpha}} = -g_1 \bar{\alpha} + K_p \bar{\omega} + g_1 y;$$

$$\dot{\bar{\omega}} = -g_2 \bar{\alpha} + \frac{c_m}{J_p} \bar{I}_\pi + g_2 y;$$

$$\dot{\bar{I}}_\pi = -g_3 \bar{\alpha} - \frac{c_e}{L_\pi} \bar{\omega} - \frac{R_\pi + R_{д.п.}}{L_\pi} \bar{I}_\pi + \frac{K_y}{L_\pi} U + g_3 y.$$

Коэффициенты матрицы  $G$  определяются при синтезе наблюдателя [1] по заданным значениям полюсов.

Конечно-разностные уравнения

$$\alpha_{(k+1)} = (1 - g_1 T) \alpha_{(k)} + K_p T \omega_{(k)} + g_1 T y_{(k)};$$

$$\omega_{(k+1)} = \omega_{(k)} - g_2 T \alpha_{(k)} + \frac{c_m}{J_p} T I_{(k)} + g_2 T y_{(k)};$$

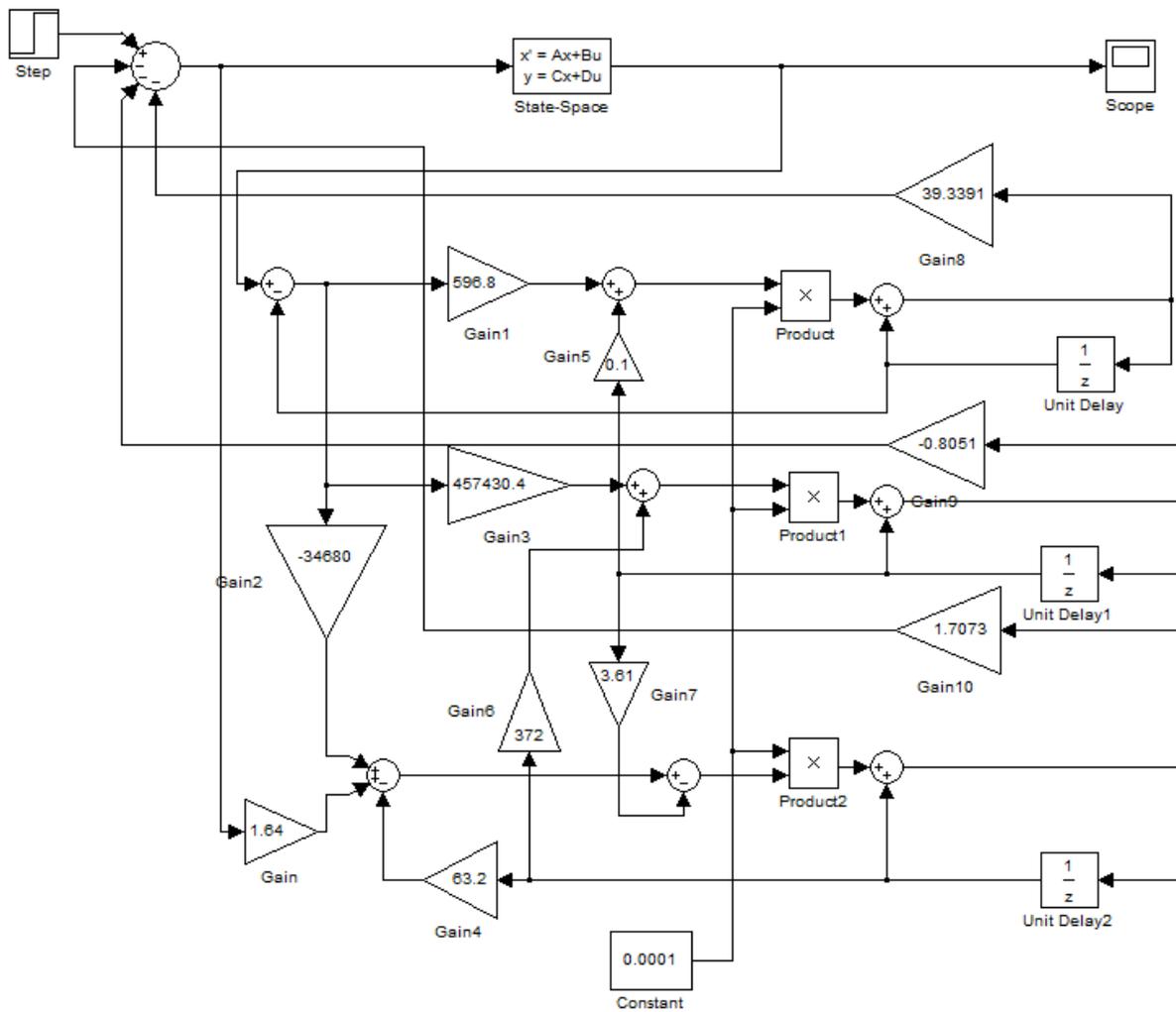
$$I_{(k+1)} = I_{(k)} - g_3 T \alpha_{(k)} - \frac{c_e}{L_\pi} T \omega_{(k)} - \frac{R_\pi + R_{д.п.}}{L_\pi} T I_{(k)} + \frac{K_y}{L_\pi} T U_{(k)} + g_3 T y_{(k)},$$

где  $T$  – период квантования.

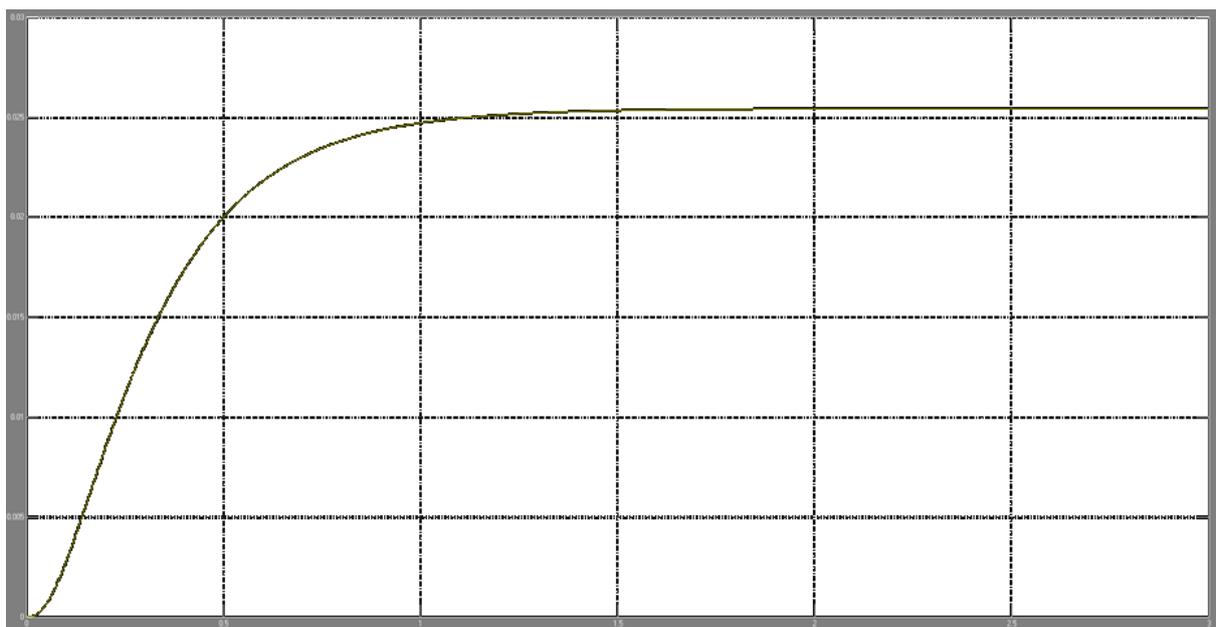
Данные уравнения позволяют реализовать наблюдателя в виде программы для контроллера. На рисунке 1 представлена математическая модель привода, синтезированного методом размещения полюсов, построенная в приложении SIMULINK, в которой наблюдатель построен непосредственно по конечно-разностным уравнениям. Это позволяет принудительно задавать желаемое значение периода квантования и таким образом исследовать его влияние на точность работы наблюдателя и, соответственно, качество работы привода в целом.

На рисунке 2 показана переходная характеристика привода, полученная с помощью данной модели при значении периода квантования 0,003 с. Результаты моделирования показывают, что при дальнейшем уменьшении периода квантования характеристика остается практически неизменной. Можно считать, что данная характеристика соответствует случаю использования аналогового наблюдателя состояния.

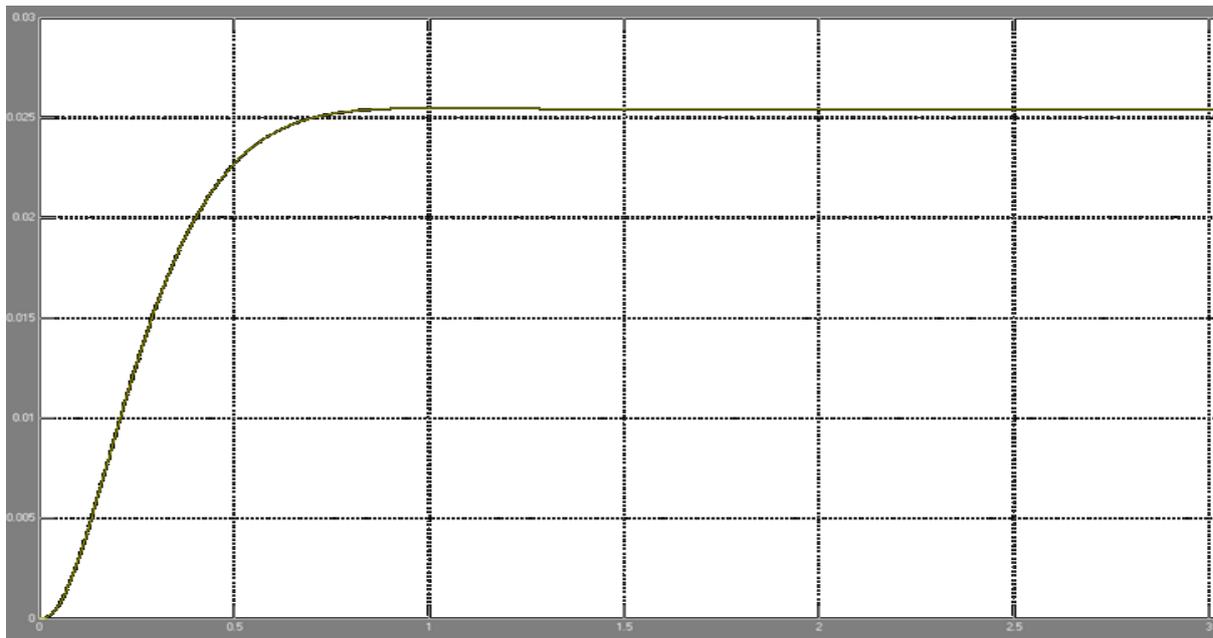
При увеличении периода квантования относительно указанного значения характеристика начинает меняться, что говорит о снижении точности работы наблюдателя. На рисунке 3 приведена переходная характеристика при периоде квантования 0,004 с. В системе начинает появляться перерегулирование, что сопровождается некоторым уменьшением времени регулирования. Но уже при периоде квантования 0,005 с система становится неустойчивой. Таким образом, для корректной работы наблюдателя цикл работы контроллера не должен превышать 0,003 с (для рассматриваемого привода), что является достаточно жестким требованием с точки зрения быстродействия. Учитывая, что переход к неустойчивой системе происходит достаточно резко, целесообразно иметь определенный запас по быстродействию, т. е. задавать время цикла еще меньше. Очевидно, что не любой программируемый контроллер подойдет для построения привода постоянного тока с наблюдателем состояния по причине недостаточного быстродействия.



**Рисунок 1 – Математическая модель привода с наблюдателем состояния в приложении SIMULINK**



**Рисунок 2 – Переходная характеристика привода с наблюдателем состояния**



**Рисунок 3 – Переходная характеристика при периоде квантования  $T = 0,004$  с**

Проведенные исследования подтверждают необходимость оценки требуемого быстродействия контроллера при построении привода постоянного тока с наблюдателем состояния методами математического моделирования. Для решения данной задачи может быть использована предложенная математическая модель. Результаты работы могут быть использованы при проектировании приводов постоянного тока.

#### **Список цитированных источников**

1. Филлипс, Ч. Системы управления с обратной связью / Ч. Филлипс Ч., Р. Харбор. – М. : Лаборатория базовых знаний, 2001. – 616 с.
2. Дорф, Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп; пер. с англ. Б. И. Копылова. – М. : Лаборатория базовых знаний, 2002. – 832 с.

УДК 621.865.8

**Кокудович Д. В., Сааков А. В.**

**Научный руководитель: к. т. н., доцент Прокопья О. Н.**

### **АНАЛИЗ МЕХАТРОННОГО МОДУЛЯ НА ОСНОВЕ СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ**

В настоящее время мехатронные системы находят все большее применение в робототехнике и других отраслях. Принципы построения данных систем определены [1, 2]. Основу данных систем составляют мехатронные модули, которые могут быть построены на основе различных типов двигателей. Синхронный электродвигатель позволяет обеспечить стабильную скорость вращения, которая зависит только от частоты питающего напряжения, что позволяет создавать высокоточные модули движения на его основе.