

УДК 621.313.292

О.А. Киселёва, А.В. Романов, Д.П. Киселёв  
**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
БЕСКОНТАКТНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

*Воронежский государственный технический университет*

*В работе проводятся исследования системы управления бесконтактным двигателем постоянного тока на базе математической модели с использованием преобразований Парка и Кларка.*

**Ключевые слова:** бесконтактный двигатель постоянного тока, математическая модель, система управления.

Качество работы системы управления в электроприводах с бесконтактным двигателем постоянного тока (БДПТ) определяется корректностью математического описания процесса восстановления выходных координат при неполной обратной связи [1,2].

На рис.1 приведена структурная схема системы управления БДПТ. Принятые обозначения в схеме:

- 1 – синхронный двигатель с постоянными магнитами (СДПМ);
- 2 – инвертор;
- 3 – широтно-импульсный модулятор;
- 4 – логические модули векторной модуляции;
- 5 – блок обратного преобразования Парка;
- 6 – регулятор тока;
- 7 – регулятор скорости или угла поворота ротора;
- 8 – датчик тока;
- 9 – датчик напряжения;
- 10 – АЦП тока;
- 11 – блок преобразования Кларка;
- 12 – блок преобразования Парка;
- 13 – АЦП напряжения;
- 14 – блок оценки магнитного потока;
- 15 – датчик положения ротора (ДПР) или датчик скорости (ДС);
- 16 – блок обработки сигналов с ДПР или ДС.

При неполной обратной связи блоки 15 и 16 отсутствуют. В некоторых электроприводах используются только для настройки системы.

Процесс регулирования БДПТ упрощается при использовании в системе управления для обработки информации обратной связи с помощью преобразований Кларка и Парка для токов статора. Это особенно важно, когда нельзя применять датчики скорости (ДС) и датчики

положения ротора (ДПР) [3]. В таких случаях хорошие результаты дают использование наблюдателей состояний в цепи обратной связи. В этом случае бывает достаточно датчиков тока (ДТ) и напряжения (ДН), которые можно установить в инверторе. Для восстановления координат обратной связи о скорости и угле поворота по сигналам ДТ и ДН результативнее вначале выполнить преобразование Кларка с информацией о токах в фазах, которое из трехфазной системы уравнений переведет в двухфазную систему, а затем преобразовать в систему координат ротора с помощью преобразования Парка.

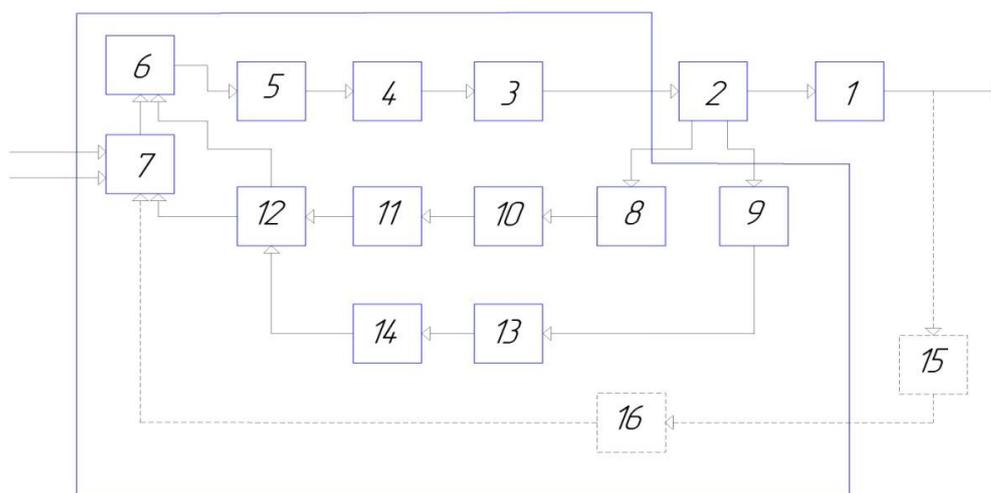


Рис.1 - Структурная схема системы управления БДПТ

Для обеспечения более четких законов управления в симметричных трехфазных цепях применение DQ0-преобразования уменьшает количество координат с трех переменного тока до двух — постоянного тока. Это позволяет проводить упрощенные расчеты с последующим обратным преобразованием для восстановления фактических трехфазных координат переменного тока. Такое преобразование используется для того, чтобы упростить анализ трехфазных синхронных машин, которые являются исполнительными элементами в БДПТ, а так же для контроля трехфазных инверторов.

Мгновенные значения фазовых токов в статоре  $i_a$ ,  $i_b$  и  $i_c$ , снимаемые в инверторе с помощью датчиков тока, можно рассматривать как три планарные системы координат. Конечно, в планарной системе есть только две степени свободы и возможны только два независимых вектора. Любая дополнительная величина может быть выражена как линейная комбинация.

Преобразование Кларка переводит трехосную систему координат в двухосную ортогональную систему. DQ0 преобразование, аналогично преобразованию, впервые предложенному в 1929 году Робертом Х.

Парком. Зачастую, DQ0-преобразование так и называется «преобразованием Парка». Постоянное по силе (мощности), движущееся направо DQ0 преобразование применяется к любым трехфазным величинам (например, напряжение, токи, потокосцепление и т.д.), записывается в матричной форме:

$$x_{dq0} = Kx_{abc} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}, \quad (1)$$

Обратное преобразование имеет вид:

$$x_{abc} = K^{-1}x_{dq0} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_o \end{bmatrix}. \quad (2)$$

DQ0 - преобразование концептуально похоже на  $\alpha\beta\gamma$  - преобразование. В то время, как DQ0 - преобразование является проекцией фазовых величин на вращающиеся две оси отсчета,  $\alpha\beta\gamma$  - преобразование можно рассматривать как проекцию фазовых величин, на стационарную систему координат, состоящую из двух осей.

$\alpha\beta\gamma$  - преобразование сравнимо с DQ0 трансформацией. Одно из самых полезных приложений альфа-бета трансформации - это генерация опорного сигнала, используемого в векторно-пространственном модуляционном контроле, в трехфазных инверторах.  $\alpha\beta\gamma$  - преобразование применяемое для трехфазных цепей, представлено ниже:

$$i_{\alpha\beta\gamma}(t) = T i_{abc}(t) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где  $i_{abc}(t)$  — общая последовательность трехфазных токов;

$i_{\alpha\beta\gamma}(t)$  — расчетный ток для вычисления трансформации  $T$ .

Обратное преобразование имеет вид:

$$i_{abc}(t) = T^{-1}i_{\alpha\beta\gamma}(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{\alpha}(t) \\ i_{\beta}(t) \\ i_{\gamma}(t) \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Преобразование Кларка сохраняет амплитуду электрических величин. Рассмотрим трехфазную симметричную систему токов прямой последовательности:

$$\begin{aligned} i_a(t) &= \sqrt{2}I \cdot \cos\theta(t); \\ i_b(t) &= \sqrt{2}I \cdot \cos\left(\theta(t) - \frac{2}{3}\pi\right); \\ i_c(t) &= \sqrt{2}I \cdot \cos\left(\theta(t) + \frac{2}{3}\pi\right), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $I$  — среднеквадратичное для  $i_a(t)$ ,  $i_b(t)$ ,  $i_c(t)$ ;

$\theta(t)$  — общий изменяющийся во времени угол.

При вычислении  $T$  к текущей последовательности, получаем:

$$\begin{aligned} i_{\alpha} &= \sqrt{2}I \cdot \cos\theta(t); \\ i_{\beta} &= \sqrt{2}I \cdot \sin\theta(t); \\ i_{\gamma} &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Последнее равенство справедливо, поскольку рассматриваем симметричную, сбалансированную систему из трех векторов тока одинаковой амплитуды. Активные и реактивные мощности, вычисленные после преобразования Кларка, не остаются равными мощностям в стандартной системе координат. Это происходит вследствие того, что матрица преобразования  $T$  в данном случае не является инвариантной. Необходимо ввести поправочный коэффициент, так, чтобы произведение прямой матрицы преобразования  $T$  на обратную ей  $T^{-1}$  давало единичную матрицу.

В этом случае амплитуды токов в  $\alpha\beta\gamma$ -системе координат будут равны:

$$\begin{aligned} i_{\alpha} &= \sqrt{3}I \cdot \cos\theta(t); \\ i_{\beta} &= \sqrt{3}I \cdot \sin\theta(t); \\ i_{\gamma} &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

В сбалансированной системе  $i_{\alpha}(t) + i_{\beta}(t) + i_{\gamma}(t) = 0$  и, следовательно,  $i_{\gamma}(t) = 0$  можно рассматривать также упрощенное « $\alpha\beta$ -преобразование».

$$i_{\alpha\beta}(t) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

Обратное преобразование:

$$i_{abc}(t) = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & 0 \\ -\frac{1}{3} & \frac{\sqrt{3}}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{\sqrt{3}}{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{\alpha}(t) \\ i_{\beta}(t) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Современный электропривод это программно-аппаратный комплекс, в котором необходимо решить вопрос о максимальном использовании программной части, а так же об уменьшении числа аппаратных датчиков [4]. Это приводит к неполной обратной связи и требует восстановление выходных координат по показаниям ДТ и ДН, расположенных в инверторе. Если в электроприводе нет ДС и ДПР, то исполнительным устройством в электроприводе выступает синхронный двигатель с постоянными магнитами. Эти двигатели широко распространены в промышленных приводах из-за их высокой удельной мощности, высокого отношению крутящего момента к моменту инерции, малой величины пульсации момента, возможности регулирования на малых скоростях, а так же возможности регулирования момента при нулевой скорости, высокому КПД и малому размеру. На рис. 2 показаны переходные характеристики электропривода с БДПТ при восстановлении координат обратной связи.

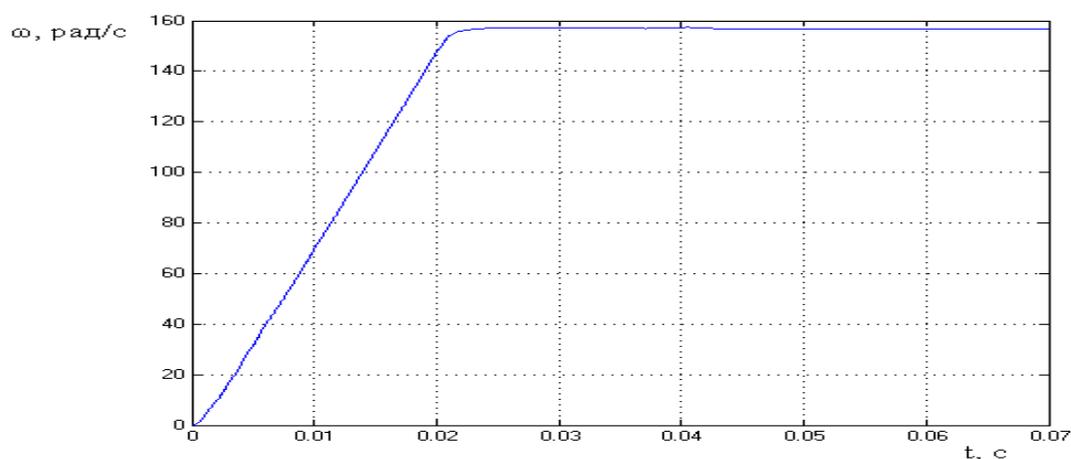


Рис.2 – Переходные характеристики в электроприводе с БДПТ

При реализации систем управления в электроприводах с БДПТ без использования ДПР и ДС, возникают проблемы связанные с восстановлением выходных координат, которые можно решить только при использовании контроллеров, способных выполнять требуемые вычисления в режиме реального времени [5].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Киселёв Д.П. Моделирование адаптивного управления в электромеханической системе/ Д.П. Киселёв, О.А. Киселёва// Моделирование, оптимизация и информационные технологии.-2014.- №3(6) - с.1-4.
2. Романов А.В. Элементы расчета систем управления электроприводов: практикум: учебное пособие / А.В.Романов, О.А. Киселёва – Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 2011.153 с.
3. Киселёва О.А. Моделирование наблюдателя состояния в электромеханической системе на базе бесконтактного двигателя постоянного тока/ О.А. Киселёва, Д.П. Киселёв // Моделирование, оптимизация и информационные технологии.-2014.- №3(6) - с.4-6.
4. Киселёва О.А. Математическая модель системы управления бесконтактным двигателем постоянного тока при наличии запаздывания по состоянию и управлению/ О.А. Киселёва, Т.В.Попова, В.Е. Букатова // Электротехнические комплексы и системы управления.- 2010.- №1.- с. 15-19.
5. Киселёва О.А. Синтез детерминированной дискретной логико-динамической системы с бесконтактными двигателями постоянного тока/ О.А. Киселёва, В.Е. Букатова, Т.В.Попова// Электротехнические комплексы и системы управления.- 2009.- №4.- с. 11-14.

O.A. Kiseleva, A.V. Romanov, D.P. Kiselev  
**MATHEMATICAL MODEL MANAGEMENT  
SYSTEM BRUSHLESS DIRECT CURRENT MOTOR**  
*Voronezh State Technical University*

*In this paper we study the control system contactless direct current motor based on a mathematical model using the Park and Clark.*

**Keywords:** contactless DC motor mathematical model, the control system.