

УДК 621.313.292

С.А. Винокуров, О.А. Киселёва, Т.В. Попова

## ИДЕАЛЬНОЕ ВЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ БЕСКОНТАКТНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА

*Воронежский государственный технический университет*

*В работе рассматриваются процессы в бесконтактном двигателе постоянного тока, для случая, когда в цепи обратной связи используются датчики положения ротора. Проводится анализ возможностей создания идеального векторного управления бесконтактным двигателем постоянного тока. Сформулированы требования к такому управлению и рассмотрены случаи идеального векторного управления, в которых могут варьироваться все три координаты - амплитуда напряжения, частота питающего напряжения, угол между полем статора и ротора. Приведены теоретические предпосылки такого способа управления, которые позволят оценить эффективность применяемых методов по сравнению с идеальным векторным управлением.*

**Ключевые слова:** бесконтактный двигатель постоянного тока, идеальное векторное управление, ситуационное управление, варьируемые параметры.

Рассмотрим процессы, протекающие в электроприводе с бесконтактными двигателями постоянного тока (БДПТ), для случая, когда в цепи обратной связи используются датчики положения ротора (ДПР).

В векторно-импульсных системах управления БДПТ обрабатываются сигналы обратной связи с ДПР, которые зависят не только от положения ротора в пространстве, но и ограничены сигнальными углами [1-3].

Проблемы, с которыми сталкиваются при решении практических задач синтеза таких систем управления БДПТ, связаны со сложностью математической модели объекта управления, в качестве которого используется синхронный двигатель с постоянными магнитами (СДПМ).

Исполнительный двигатель - СДПМ, подключается к импульсному усилителю мощности (инвертору), который управляется цифровой системой. Чаще всего в современных электроприводах с БДПТ, инвертор представляет собой интеллектуальный модуль, в котором решаются вопросы не только коммутации рабочего тока в СДПМ, но и вопросы защиты от перенапряжения, перегрева, рекуперации энергии, устойчивой работы, а также, что немало важно, исключение влияния энергетического канала на информационные каналы. Одни из них решаются на аппаратном уровне, а другие - программно.

Цифровая система управления реализует алгоритм формирования управляющих импульсов для инвертора, используя информацию о величине протекающих токов, направлении и частоте вращения, положении ротора, полученном с ДПР, разрядности данных. Сформированная циклическая последовательность управляющих сигналов, поступает в инвертор. Как в любой замкнутой системе автоматического

управления необходимо вычисление ошибок в каждом из контуров регулирования и формирование входных сигналов на инвертор.

Разработку алгоритма управления необходимо начинать с описания метода импульсного управления, затем с анализа запрещенных состояний и переходов, которые могут привести к аварийным ситуациям. Остальной процесс связан с формализацией совокупности условий в виде системы переменных и функций, формировании таблицы состояний управляющих булевых функций.

При построении цифровой системы управления необходимо решать проблему запаздываний в контурах регулирования и накопления вычисляемой ошибки регулирования из-за большого числа математических операций [4-7].

Для формирования управляющей функции БДПТ необходимо вначале сформировать требования к идеальному векторному управлению. На Рисунке 1 приведена эквивалентная схема идеального векторного управления БДПТ.

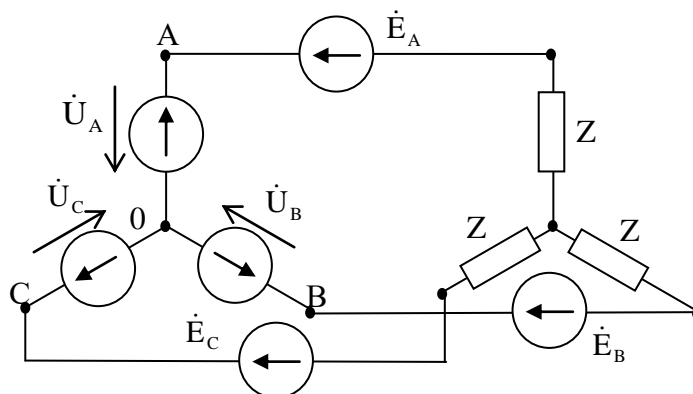


Рисунок 1 - Эквивалентная схема идеального векторного управления БДПТ

Определим ток, протекающий в фазе А

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A - \dot{E}_A}{Z_A} = \frac{\alpha \cdot U - \nu E_0 \cdot e^{-j\theta}}{\sqrt{R^2 + (\nu \omega_0 L)^2}} e^{-j\psi}, \quad (1)$$

где  $\psi = \arctg \frac{\nu \omega_0 L}{R}$  - угол сдвига фаз,

$\omega_0$  - скорость холостого хода, которую может достичь СДПТ при  $\alpha=1$  и оптимальном значении угла  $\Theta$ ,

$R$  – активное сопротивление,

$L$  – индуктивность одной фазы,

$\alpha$  - коэффициент, характеризующий управление амплитудой напряжения,

$\Theta_\omega$  - управление углом между полем ротора и статора при постоянной частоте  $\omega$ ,

$\dot{U}_A = U \cdot e^{j0^\circ}$  - вектор напряжения в фазе А,

$\nu = \frac{\omega}{\omega_0}$  - относительная частота вращающегося поля.

Рассмотрим процесс управления по двум координатам  $\alpha\Theta_\omega$ , то есть можно менять угол между полем ротора и статора и амплитуду напряжения.

Перейдем к относительным единицам, для этого представим формулу (1) в виде

$$\dot{I}_A = \frac{\alpha \cdot U \cdot e^{-j\psi}}{\sqrt{R^2 + (\nu\omega_0 L)^2}} - \frac{\nu E_0 \cdot e^{-j\Theta} e^{-j\psi}}{\sqrt{R^2 + (\nu\omega_0 L)^2}}. \quad (2)$$

Относительный вектор вращающегося тока статора

$$\hat{i} = \frac{\alpha \cdot e^{-j\psi}}{\sqrt{1 + (\nu\omega_0 \tau)^2}} - \frac{\nu \cdot e^{-j(\Theta + \psi)}}{\sqrt{1 + (\nu\omega_0 \tau)^2}}, \quad (3)$$

где  $\psi = \arctg \nu\omega_0 \tau$ ,

$\tau = \frac{L}{R}$  - электромагнитная постоянная времени одной фазы СДПМ.

Вектор поля ротора формируется токами в фазах *a*, *b* и *c* и совпадает с направлением относительного вектора вращающегося тока статора  $\hat{i}$ .

Рассмотрим различные ситуации, исходя из того, что варьируемыми могут быть три параметра [4,8]:

- амплитуда напряжения ( $\alpha$ );
- частота питающего напряжения ( $\omega$ );
- угол между полем статора и ротора ( $\Theta$ ).

Идеальное векторное управление, в котором могут варьироваться все три координаты, назовём ( $\alpha \Theta \omega$ ). Наличие параметра в индексе будет говорить о постоянстве этой координаты.

Рассмотрим следующие случаи управления:

- $-\alpha_{\Theta, \omega}$  - по амплитуде напряжения;
- $-\Theta_{\alpha, \omega}$  - по углу между полем статора и ротора;
- $-\omega_{\alpha, \Theta}$  - по частоте питающего напряжения;
- $-\alpha\Theta_\omega$  - по амплитуде питающего напряжения и углу между полем ротора и статора при постоянстве частоты;

- -  $\omega_{\alpha}$  - по частоте и углу между полем ротора и статора при постоянной амплитуде напряжения;
- -  $\alpha\omega_{\theta}$  - по амплитуде и частоте питающего напряжения при поддержке угла  $\Theta = \text{const}$ ;
- -  $\alpha\Theta\omega$  - по амплитуде напряжения, углу между полем ротора и статора и частоте питающего напряжения.

Исследуя уравнение (3) определим условия управляемости системы с БДПТ на базе СДПМ.

Уравнение представим в алгебраической форме записи

$$\hat{i} = \hat{i}_a + j\hat{i}_p, \quad \text{где}$$

$$\hat{i}_a = \frac{\alpha \cdot \cos \psi}{\sqrt{1 + (\nu \omega_0 \tau)^2}} - \frac{\nu \cdot \cos(\Theta + \psi)}{\sqrt{1 + (\nu \omega_0 \tau)^2}}, \quad (4)$$

$$\hat{i}_p = \frac{-\alpha \cdot \sin \psi}{\sqrt{1 + (\nu \omega_0 \tau)^2}} + \frac{\nu \cdot \sin(\Theta + \psi)}{\sqrt{1 + (\nu \omega_0 \tau)^2}}. \quad (5)$$

Из уравнений (4) и (5) можно получить условия для идеального формирования управляющей функции, исходя из того, что угол  $\varphi$  между вектором тока и напряжения равен нулю,  $\cos \varphi = 1$ .

$$\hat{i}_p = 0 \quad -\alpha \cdot \sin(\psi) + \nu \cdot \sin(\Theta + \psi). \quad (6)$$

Для управления  $\alpha_{\theta, \omega}$

$$\alpha = \frac{\nu \cdot \sin(\Theta + \psi)}{\sin \psi}. \quad (7)$$

Для управления  $\omega_{\alpha, \theta}$

$$\nu = \frac{\alpha \cdot \sin \psi}{\sin(\Theta + \psi)}. \quad (8)$$

Для управления  $\Theta_{\alpha, \omega}$

$$\begin{aligned} \sin(\Theta + \psi) &= \frac{\alpha}{\nu} \cdot \sin \psi, \\ \Theta &= -\psi + \arcsin\left(\frac{\alpha}{\nu} \cdot \sin \psi\right), \end{aligned} \quad (9)$$

где  $\psi = \arctg \nu \omega_0 \tau$ .

При дуальном управлении можно использовать формулы (7-9).

Отсюда можно сформулировать условия идеального векторного управления для электропривода с БДПТ. Для обеспечения  $\cos \varphi \approx 1$  необходимо выполнения условия

$$\nu \cdot \sin(\Theta + \psi) = \alpha \cdot \sin \psi. \quad (14)$$

В этом случае ток будет в относительных единицах равен активной составляющей и моменту нагрузки

$$\mu_H = \frac{\alpha \cdot \cos \psi - \nu \cdot \cos(\Theta + \psi)}{\sqrt{1 + (\nu \omega_0 \tau)^2}}. \quad (15)$$

Обеспечение этих условий наиболее рационально при использовании управления  $\alpha \Theta_\omega$ . Так как рассматривается идеальное управление, то потери в меди и стали не учитываются.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Винокуров С.А. Методология синтеза электромеханических систем с бесконтактным двигателем постоянного тока с накоплением информации о состоянии/ С.А. Винокуров. О.А. Киселёва, В.Е. Букатова// Системы управления и информационные технологии. 2008. Т. 34. № 4.1 С.153-156.
2. Винокуров С.А. Адаптивная идентификация электромеханических систем с бесконтактными двигателями постоянного тока/ С.А. Винокуров. О.А. Киселёва, В.Е. Букатова// Вестник Воронежского государственного технического университета. 2007. Т.3. № 5. С. 99-102.
3. 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. Киселёва О.А. Функции регулятора тока системы управления бесконтактным двигателем постоянного тока/ О.А. Киселёва, Д.П. Киселёв, Т.В. Попова// Моделирование, оптимизация и информационные технологии, 2015. №1 (8). С.7.
5. Киселёва О.А. Математическая модель системы управления бесконтактным двигателем постоянного тока при наличии запаздываний по состоянию и управлению/ О.А. Киселёва, Т.В. Попова, В.Е. Букатова // Электромеханические комплексы и системы управления. -2010. - №1. – с.15-19.
6. Киселёва О.А. Математическая модель управления дискретной системой с бесконтактным двигателем постоянного тока/О.А. Киселёва, Т.В. Попова, В.Е. Букатова // Электротехнические комплексы и системы управления.- 2009.- №3 - с. 43-46.
7. 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.

8. Киселёва О.А. Исследование электроприводов с бесконтактными двигателями постоянного тока с позиции методологии логико-динамических систем/ О.А. Киселёва, С.А. Винокуров, В.Е. Букатова // Системы управления и информационные технологии. 2008. Т. 33. № 3. С.89-93.

S.A. Vinokurov, O.A. Kiseleva, T.V. Popova

## IDEAL VECTOR CONTROL OF THE CONTACTLESS ENGINE OF THE DIRECT CURRENT

*Voronezh state technical university*

*In work the operation processes in the noncontact engine of a direct current are considered, for a case when in a circuit of back coupling sensors of provision of a rotor are used. The analysis of opportunities of creation of ideal vectorial control of the noncontact engine of a direct current is carried out. Requirements to such control are formulated and cases ideal vectorial control in which all three coordinates - a voltage amplitude, the frequency of power voltage, an angle between a field of the stator and a rotor can vary are considered. Theoretical premises of such method of control which will allow to estimate efficiency of the applied methods in comparison with ideal vectorial control are given.*

**Keywords:** the contactless engine of a direct current, ideal vector management, situational management, the varied parameters.

### REFERENCES

1. Vinokurov S.A. Metodologiya sinteza elektromekhanicheskikh sistem s beskontaktnym dvigatelem postoyannogo toka s nakopleniem informatsii o sostoyanii/ S.A. Vinokurov. O.A. Kiseleva, V.E. Bukatova// Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii. 2008. Vol. 34. No. 4.1 pp.153-156.
2. Vinokurov S.A. Adaptivnaya identifikatsiya elektromekhanicheskikh sistem s beskontaktnymi dvigatelyami postoyannogo toka/ S.A. Vinokurov. O.A. Kiseleva, V.E. Bukatova// Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2007. Vol.3. No. 5. pp.99-102.
3. Kiselev D.P. Modelirovanie adaptivnogo upravleniya v elektromekhanicheskoy sisteme/ D.P. Kiselev, O.A. Kiseleva// Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii. 2014. No.3(6). S.1.
4. Kiseleva O.A. Funktsii regul'yatora toka sistemy upravleniya beskontaktnym dvigatelem postoyannogo toka/ O.A. Kiseleva, D.P. Kiselev, Vol.V. Popova// Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii, 2015. No.1 (8). pp.7.
5. Kiseleva O.A. Matematicheskaya model' sistemy upravleniya beskontaktnym dvigatelem postoyannogo toka pri nalichii zapazdyvaniy po sostoyaniyu i

- upravleniyu/ O.A. Kiseleva, Vol.V. Popova, V.E. Bukatova // Elektromekhanicheskie komplekсы i sistemy upravleniya. -2010. - No.1. – pp.15-19.
6. Kiseleva O.A. Matematicheskaya model' upravleniya diskretnoy sistemoy s beskontaktnym dvigatelem postoyannogo toka/O.A. Kiseleva, Vol.V. Popova, V.E. Bukatova // Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya.- 2009.- No.3 - pp. 43-46.
  7. Kiselev D.P. Modelirovanie adaptivnogo upravleniya v elektromekhanicheskoy sisteme/ D.P. Kiselev, O.A. Kiseleva// Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii. 2014. No.3(6). pp.1.
  8. Kiseleva O.A. Issledovanie elektroprivodov s beskontaktnymi dvigatelyami postoyannogo toka s pozitsii metodologii logiko-dinamicheskikh sistem/ O.A. Kiseleva, S.A. Vinokurov, V.E. Bukatova // Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii. 2008. Vol. 33. No. 3. S.89-93.