DOI: 10.25515/PMI.2018.1.92

УДК 621.314.04

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ БЕЗДАТЧИКОВОГО ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ СИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ В MATLAB SIMULINK

В.Я.ФРОЛОВ, Р.И.ЖИЛИГОТОВ
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

В последние 20 лет растет доля электропривода с использованием синхронных двигателей с постоянными магнитами. Данный тип двигателей обладает лучшими техническими показателями по сравнению с асинхронными двигателями, однако имеет ряд сложностей в реализации, одной из них является необходимость получения информации о положении ротора. Это можно сделать с использованием датчиков или без них, посредством наблюдателя состояния двигателя.

В статье рассмотрены проблемы бездатчикового управления синхронным двигателем с постоянными магнитами. Описана система векторного управления синхронным двигателем с постоянными магнитами с использованием наблюдателя состояния. Показан синтез наблюдателя скорости и положения ротора, работающего на скользящих режимах. Алгоритм реализован посредством создания модели в среде Matlab Simulink с использованием блоков поддержки процессоров Texas Instruments. Проведено опытное сравнение результатов вычисления угла положения ротора наблюдателем и данных, полученных с использованием датчиков положения ротора. Целью работы является получение алгоритма управления, обладающего достаточной точностью вычисления угла положения ротора, широким диапазоном регулирования скорости и устойчивостью к дрейфу параметров двигателя.

***Ключевые слова*:** векторное управление, наблюдатель состояния двигателя, синхронная машина с постоянными магнитами, бездатчиковое управление, частотно-регулируемый электропривод

***Как цитировать эту статью*:** Фролов В.Я. Разработка системы бездатчикового векторного управления синхронным двигателем с постоянными магнитами в Matlab Simulink / В.Я.Фролов, Р.И.Жилиготов // Записки Горного института. 2018. Т. 229. С. 92-97. DOI: 10.25515/PMI.2018.1.92

Введение. В последние 20 лет широкое распространение получили системы электропривода на основе синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ). В такой системе обязательно наличие преобразователя и системы управления [1, 3, 15]. Система управления регулирует порядок переключения ключей инвертора согласно закону управления. В случае векторного управления требуется получить заданный поток и электромагнитный момент. Системы векторного управления СДПМ для корректной работы требуют определения положения ротора. Это может быть осуществлено посредством датчиков положения либо введением в контур регулирования наблюдателя состояния двигателя. Бездатчиковое управление подразумевает отсутствие датчиков положения и скорости на валу машины. Применение бездатчикового управления требует наличия наблюдателя, который вычисляет положение ротора и его скорость [5, 14, 16].

В статье реализована структура электропривода с поддержанием заданной частоты вращения. Наблюдатель представляет собой математическую модель двигателя, входными данными которой являются токи в линиях, питающих двигатель. К наблюдателю предъявляются требования устойчивости к шумам в измерительных каналах, обеспечение широкого диапазона регулирования скорости и низкая зависимость от дрейфа параметров двигателя [6, 11, 12].

Система векторного управления СДПМ. Структурная схема модели представлена на рис.1. Блок задания скорости имеет в своем составе задатчик интенсивности, величина задания на выходе данного блока меняется плавно, тем самым обеспечивается нужный темп разгона двигателя. Блок контроллера скорости содержит ПИД-регулятор, выходной величиной которого является задание на момент. Блок векторного управления имеет наблюдатель, который вычисляет скорость двигателя и передает этот сигнал на вход ПИД-регулятора скорости [2, 4], замыкая, таким образом, петлю обратной связи. Контур регулирования скорости работает с частотой дискретизации 100 Гц.

На вход блока векторного управления поступает сигнал задания на момент, сигналы с датчиков тока фаз A и B двигателя. Датчики тока реализованы посредством токовых шунтов. Ток фазы C вычисляется как сумма двух измеренных токов с обратным знаком:

$$i_c = -(i_a + i_b). \qquad (1)$$

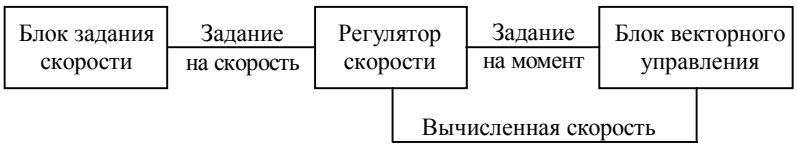


Рис.1. Диаграмма общей структуры алгоритма

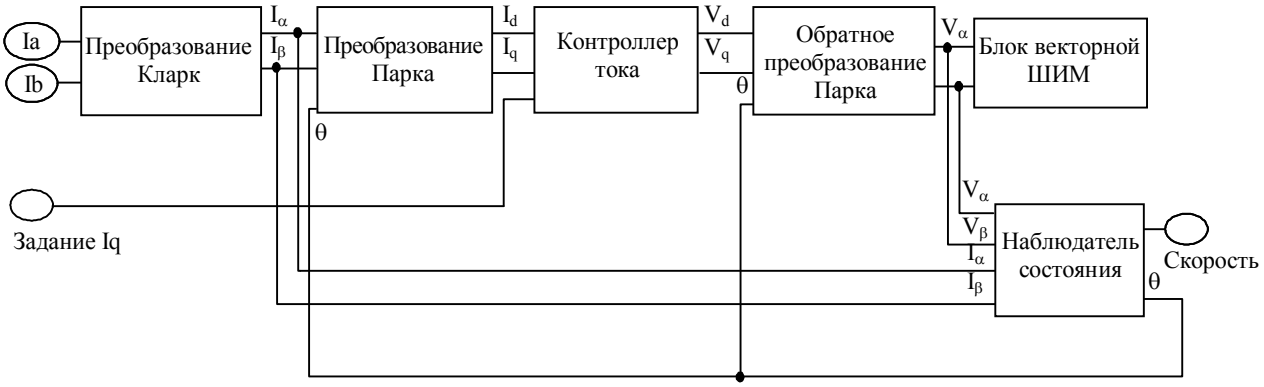


Рис.2. Структура алгоритма векторного управления СДПМ

Векторное управление синхронным двигателем с постоянными магнитами подразумевает следующие преобразования: преобразование Кларк – переход от трехфазной системы координат к неподвижным осям α и β:

$$I_\alpha = I_a;$$
$$I_\beta = \frac{I_b - I_c}{\sqrt{3}}, \tag{2}$$

затем используется преобразование Парка – поворот векторов на заданный угол, тем самым мы переходим к вращающейся системе координат, связанной с ротором в осях *d* и *q*:

$$I_d = I_\alpha \sin(wt) - I_\beta \cos(wt);$$
$$I_q = I_\alpha \cos(wt) + I_\beta \sin(wt). \tag{3}$$

Блок векторного управления представляет собой контур регулирования токов двигателя по осям *d* и *q*. Регулирование этих токов происходит посредством ПИ-регуляторов, на входы которых подаются сигналы задания. Ток I_d должен быть равен нулю, так как поток машины создается постоянными магнитами. Значения задания отличные от нуля могут быть использованы для разгона двигателя до скорости выше возможной для соответствующего напряжения питания путем снижения противоЭДС посредством ослабления поля [9]. Ток I_q пропорционален заданному моменту. Сигналы с выходов ПИ-регуляторов тока поступают на вход блока обратного преобразование Парка (рис.2), осуществляется переход к неподвижной системе координат:

$$I_\alpha = I_d \sin(wt) + I_q \cos(wt);$$
$$I_\beta = -I_d \cos(wt) + I_q \sin(wt). \tag{4}$$

Сигналы задания на напряжения по осям α и β поступают на блок векторной широтно-импульсной модуляции (ШИМ), в котором формируются продолжительности и порядок включения ключей инвертора [17]. Контур регулирования токов работает на частоте ШИМ. Измерение токов в линиях, питающих двигатель, проводится с той же частотой.

Наблюдатель состояния двигателя. Пренебрегая неравномерностью поля ротора, можно записать уравнения для тока статора:

$$\frac{d}{dt} i_s = A i_s + B\left(v_s - e_s\right). \tag{5}$$

Матрицы *A* и *B* определяются выражениями:

$$A = -\frac{R}{L} I;\ B = \frac{1}{L} I;\ L = \frac{3}{2} L_m,$$

где I – единичная матрица размером 2×2; R и L_m – активное сопротивление и индуктивность фазной обмотки статора.

DOI: *10.25515/PMI.2018.1.92*

В состав структуры наблюдателя (рис.3) входит математическая модель двигателя, релейный регулятор, фильтр, вычислитель угла потока ротора, корректор угла потока ротора [10, 13, 19-21]. На первом этапе наблюдатель находит ошибку между вычисленным и измеренным током статора. Вычисления происходят согласно выражениям:

$$\frac{d}{dt}\tilde{i}_s = A\tilde{i}_s + B\left(v_s^* - \tilde{e}_s + z\right); \tag{6}$$

$$z = k\,\mathrm{sgn}\left(\tilde{i}_s - i_s\right), \tag{7}$$

где $\tilde{i}_s$ – вычисленный ток; v_s^* – заданное напряжение на статоре; i_s – измеренный ток.

Целью работы регулятора является сведение ошибки между измеренными и вычисленными токами к нулю [7-9, 12]. Этого можно достичь, используя выражения, записанные в дискретном виде:

$$\tilde{i}_s(n+1) = F\tilde{i}_s(n) + G\left(v_s^*(n) - \tilde{e}_s(n) + z(n)\right); \tag{8}$$

$$z(n) = k\,\mathrm{sgn}\left(\tilde{i}_s(n) - i_s(n)\right), \tag{9}$$

где $F = \exp\left(-\frac{R}{L}T_s\right)$; $G = \frac{1}{R}\left(1 - \exp\left(-\frac{R}{L}T_s\right)\right)$; T_s – период несущей частоты.

Осуществляется фильтрация сигнала ЭДС обратной связи [18, 22] согласно выражению

$$\frac{d}{dt}\tilde{e}_s = -\omega_0\tilde{e}_s + \omega_0 z\,, \tag{10}$$

где $\omega_0 = 2\pi f_0$; f_0 – частота среза фильтра.

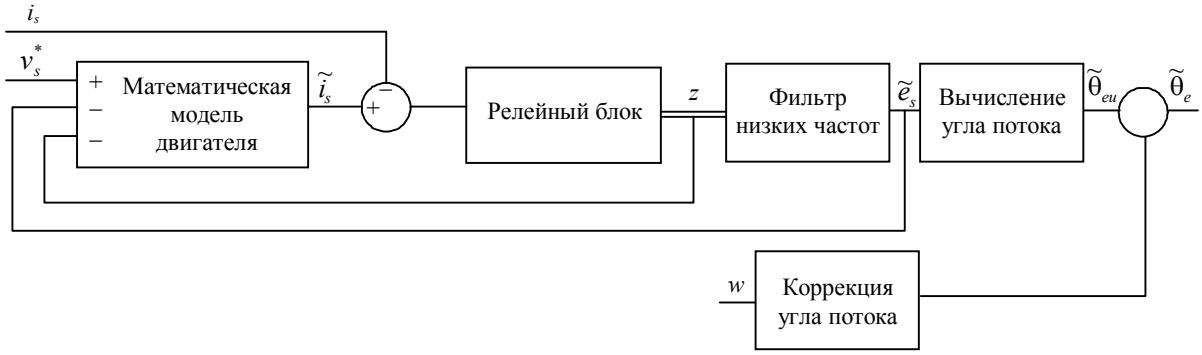


Рис.3. Структура наблюдателя, работающего на скользящих режимах

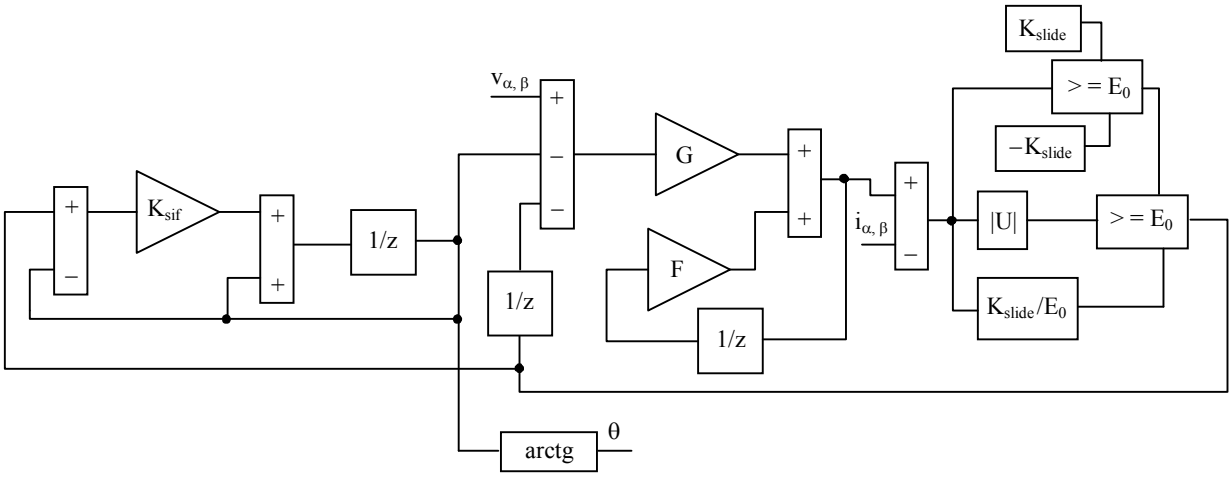


Рис.4. Наблюдатель состояния, составленный с использованием выражений (8)-(13)

DOI: *10.25515/PMI.2018.1.92*

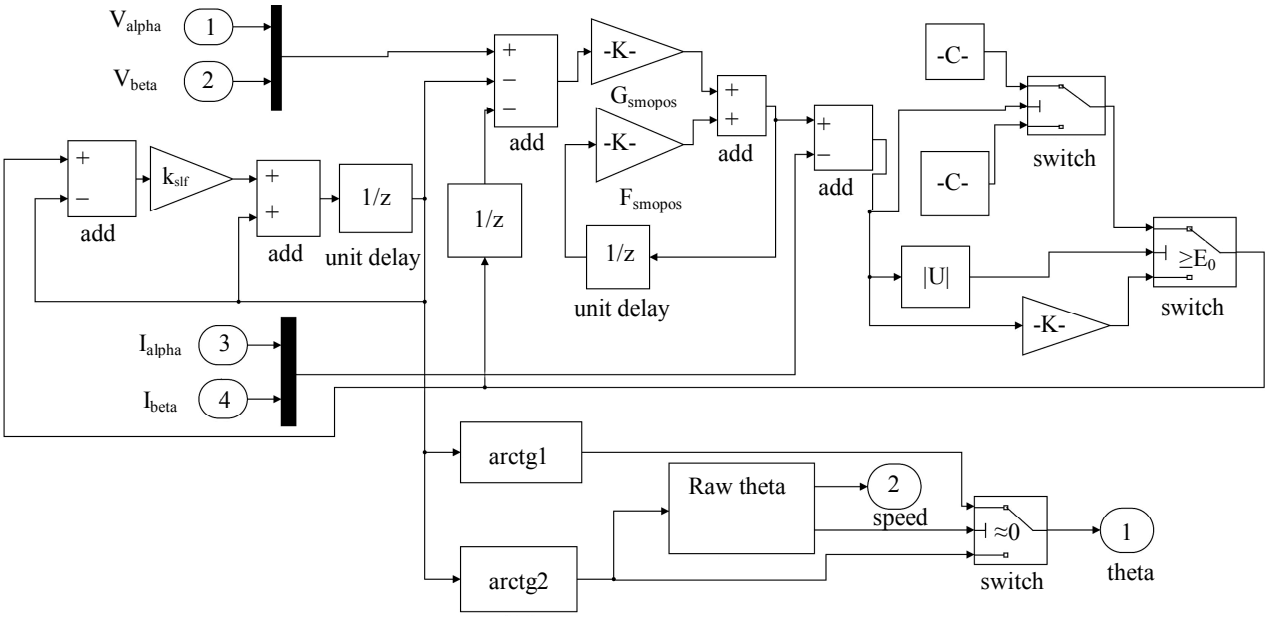


Рис.5. Модель наблюдателя состояния в Matlab Simulink

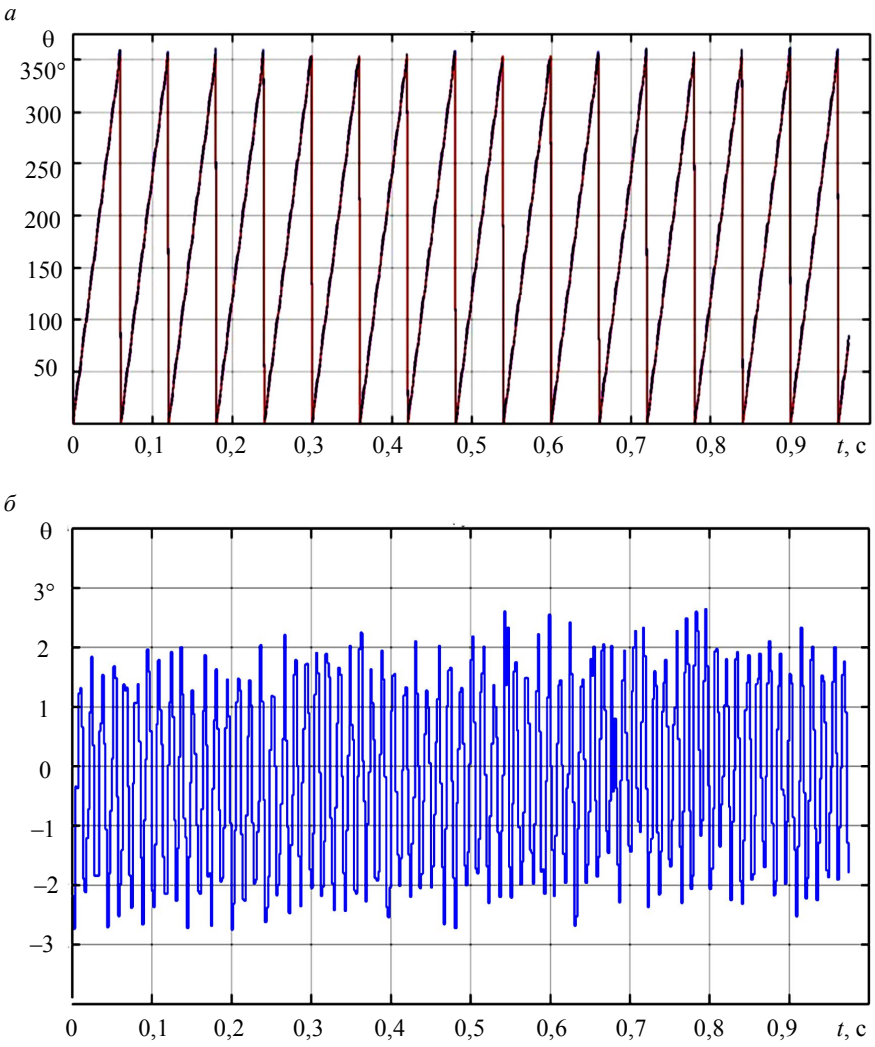


Рис.6. Результаты экспериментальных исследований представленного наблюдателя: *а* – измеренный (красная линия) и вычисленный (синяя линия) углы; *б* – ошибка вычисления угла

Из выражения (6) получим

$$\tilde{e}_s(n+1) = \tilde{e}_s(n) + 2\pi f_0\left(z(n) - \tilde{e}_s(n)\right), \tag{11}$$

значение угла потока ротора определим из соотношения

$$e_s = \frac{3}{2} k_e \omega \begin{pmatrix} -\sin\theta \\ \cos\theta \end{pmatrix}. \tag{12}$$

Таким образом, угол потока ротора определяется как угол между векторами вычисленных противоЭДС по осям α и β:

$$\tilde{\theta}_{eu} = \operatorname{arctg}\left(-\tilde{e}_{s\alpha}, \tilde{e}_{s\beta}\right). \tag{13}$$

Система скользящего наблюдателя состояния синхронного двигателя с постоянными магнитами, представленная на рис.4, была реализована в среде Matlab Simulink (рис.5).

Результаты. Модель настроена с использованием паспортных данных двигателя, шаг расчета угла положения ротора двигателя соответствует несущей частоте широтно-импульсной модуляции 20 кГц. В ходе работы было проведено сравнение угла положения ротора, вычисленного наблюдателем состояния и полученного с использованием датчиков Холла. Результаты сравнения представлены на рис.6. Приведенный режим соответствует частоте вращения 1000 об/мин.

Заключение. В статье представлена реализация бездатчикового управления синхронным двигателем с постоянными магнитами с применением наблюдателя, работающего на скользящих режимах. Для использования наблюдателя потребовались два датчика тока, установленных на линиях, питающих двигатель, знания о напряжении задания. Также должны быть известны параметры статора двигателя – индуктивность и активное сопротивление. Представленный наблюдатель показывает хорошие результаты при вычислении угла потока и скорости вращения ротора в широком диапазоне скоростей и может быть применен в схеме управления с функцией размагничивания для работы на высоких скоростях. Структура наблюдателя позволяет избежать увеличения ошибки вычисления угла при дрейфе параметров двигателя (например, вследствие нагрева). Полученная система управления может быть использована как замена способов определения положения ротора при помощи измерения противоЭДС в свободной фазе [16], а также с применением тестовых сигналов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Буров В.Н.* Силовая электроника: Полупроводниковые преобразователи для управления асинхронными двигателями и их энергетические показатели: Учеб. пособие / В.Н.Буров, В.Я.Фролов. СПб: Изд-во Политехнического университета, 2014. 106 с.

2. *Жилиготов Р.И.* Векторное управление бесколлекторным двигателем постоянного тока / Р.И.Жилиготов, В.Я.Фролов // Неделя науки СПбПУ: Материалы научной конференции с международным участием / Институт энергетики и транспортных систем. Ч. 2. СПб: Изд-во Политехнического университета, 2016. С. 160-162.

3. *Фролов В.Я.* Силовая электроника: Учеб. пособие / В.Я.Фролов, В.В.Смородинов, С.Г.Зверев. СПб: Изд-во Политехнического университета, 2011. 280 с.

4. An extended electromotive force model for sensorless control of interior permanent magnet synchronous motors / Z.Chen, M.Tomita, S.Doki, S.Okuma // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2003. Vol. 50. N 20. P. 288-295.

5. *Drakunov S.V.* Sliding-Mode Observers Based on Equivalent Control Method // Proceedings of the 31st Conference on Decision and Control. Tucson, Arizona. 1992. P. 2368-2369.

6. *Edwards C.* A sliding-mode control observer based FDI scheme for the ship benchmark / C.Edwards, S.K.Spurgeon // European Journal of Control. 2000. Vol. 6. P. 341-356.

7. *Edwards C.* On the development of discontinuous observers / C.Edwards, S.K.Spurgeon // International Journal of Control. 1994. Vol. 59. P. 1211-1229.

8. *Edwards C.* Robust output tracking using a sliding-mode controller/observer scheme / C.Edwards, S.K.Spurgeon // International Journal of Control. 1996. Vol. 64. P. 967-983.

9. *Edwards C.* Sliding Mode Control: Theory and Applications / C.Edwards, S.K.Spurgeon. Taylor & Francis, 1998. 237 p.

10. *Edwards C.* Sliding-mode observers for fault detection / C.Edwards, S.K.Spurgeon, R.J. Patton // Automatica. 2000. Vol. 36. P. 541-553.

11. *Edwards C.* Sliding-mode output tracking with application to a multivariable high temperature furnace problem / C.Edwards, S.K.Spurgeon // International Journal of Robust and Nonlinear Control. 1997. Vol. 7. P. 337-351.

12. Estimation of rotor position and speed of permanent magnet synchronous motors with guaranteed stability / R.Ortega, L.Praly, A.Astolfi, T.Lee, K.Nam // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2010. N 99. P. 1-13.

13. *Janiszewski D.* Extended Kalman Filter Estimation of Mechanical State Variables of a Drive with Permanent Magnet Synchronous Motor // Studies in Automation and Information Technology. 2004. Vol. 28/29. P. 79-90.

14. *Pacas M.* Sensorless drives in industrial applications // IEEE Industrial Electronics Magazine. 2011. Vol. 5. N 2. P. 16-23.

15. *Pillay P.* Modeling of permanent magnet motor drives / P.Pillay, R.Krishnan // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 1988. Vol. 35. P. 537-541.

16. Sensorless control strategy for salient-pole PMSM based on extended EMF in rotating reference frame / S.Morimoto, K.Kawamoto, M.Sanada, Y.Takeda // Proc. 2001 IEEE IAS Annual Meeting. 2011. Vol. 4. P. 2637-2644.

17. *Trzynadlowski A.M.* Space vector PWM technique with minimum switching losses and a variable pulse rate / A.M.Trzynadlowski, R.L.Kirlin, S.F.Legowski // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 1997. Vol. 44. N 2. P. 173-181.

18. *Utkin V.I.* Sliding Mode Control Design Principles and Applications to Electric Drives // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 1993. Vol. 40. P. 23-36.

19. *Utkin V.I.* Sliding Mode Control in Electromechanical Systems / V.I.Utkin, J.Guldner, J.Shi. Taylor & Francis. 1999. 325 p.

20. *Utkin V.I.* Sliding Modes in Control Optimization. Berlin: Springer-Verlag, 1992. 286 p. DOI: 10.1007/978-3-642-84379-2

21. *Utkin V.I.* Variable structure systems with sliding-modes // IEEE Transactions on Automatic Control. 1977. Vol. 2. P. 212-222.

22. *Yan Z.* Sliding mode observers for electric machines-an overview / Z.Yan, V.Utkin // Conf. Rec. IEEE-IES 28th Annual Meeting IECON 2002. Vol. 3 (2002). P. 1842-1847.

***Авторы*: В.Я.Фролов**, *д-р техн. наук*, *профессор*, *frolov.eed@gmail.com* (*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*, *Санкт-Петербург*, *Россия*), **Р.И.Жилиготов**, *ассистент*, *zhiligotov@gmail.com* (*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*, *Санкт-Петербург*, *Россия*).

Статья принята к публикации 31.03.2017.