

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ РОТОРА СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ВОЗБУЖДЕНИЕМ ОТ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ*

Н.В. Клиначев, Н.Ю. Кулёва, С.Г. Воронин

Описан наблюдатель электрического угла поворота вала синхронного двигателя с постоянными магнитами, состоящий из вычислителя проекций вектора потокоцепления на оси неподвижной системы координат α - β и следящего контура, сопровождающего этот вектор по фазе (контур фазовой автоподстройки частоты, далее ФАПЧ). Показано, что в режимах движения электропривода с постоянным ускорением ошибка следящего контура имеет постоянную составляющую. Для её устранения предложено использовать метод комбинированного управления. В качестве опорного сигнала на интегратор угла следящего контура (контур ФАПЧ) подается выходящая координата наблюдателя скорости вала эквивалентного двигателя постоянного тока. ПИ-регулятор компенсирует малые отклонения в контуре. Модификация наблюдателя не препятствует функционированию следящего контура в скользящем режиме. Сторонний наблюдатель скорости вала позволяет замкнуть контур скорости привода с сохранением предельной для двигателя динамики.

Ключевые слова: электропривод, бездатчиковый, векторный, релейно-векторный, синхронный двигатель с постоянными магнитами, наблюдатель, потокоцепление, ФАПЧ, моделирование в Jigrein4WEB.

Введение

Для обеспечения работы синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов (СДПМ) в режиме вентильного двигателя (ВД) требуется информация об угловом положении ротора относительно статора. При этом во многих случаях использование для этой цели отдельного датчика углового положения в виде вращающегося трансформатора, редуктосина или энкодера нежелательно или недопустимо. Отсюда возникает задача косвенного определения положения ротора относительно статора по наблюдаемым координатам, мгновенным значениям фазных напряжений и токов, и формирования на этой основе одной из перечисленных координат. Имеются технические решения, позволяющие решить такую задачу [1]. К ним относится, в частности, метод определения положения ротора по наблюдаемым значениям потокоцепления статорной обмотки в неподвижной системе координат по ортогональным осям α и β [2]. При всей очевидности и кажущейся простоте этого метода при его практической реализации возникает ряд сложностей. Во-первых, возникает проблема численного интегрирования наблюдаемых производных от потокоцепления [3], во-вторых, возможны затруднения при использовании полученной информации для формирования фазных напряжений или токов ВД и, что особенно важно параметры двигателя – индуктивность, активное сопротивление обмотки и намагниченность ротора могут изменяться. В настоящей статье сделана попытка решения перечисленных проблем с

подтверждением эффективности полученных технических решений путём численного моделирования электропривода.

Наблюдатель электрического угла поворота вала СДПМ для цифровой системы управления

Обратимся к известному уравнению напряжений статорной обмотки электродвигателя переменного тока, записанному в векторной форме:

$$\vec{U} = \vec{I}R + d\vec{\Psi}_s/dt, \quad (1)$$

где \vec{U} , \vec{I} , $\vec{\Psi}_s$ – мгновенные значения векторов напряжения, тока и потокоцепления статора, R – активное сопротивление статорной обмотки.

Потокоцепление статорной обмотки можно записать следующим уравнением:

$$\vec{\Psi}_s = L_s \cdot d\vec{I}/dt + \vec{\Psi}, \quad (2)$$

где L_s – индуктивное сопротивление статорной обмотки, а $\vec{\Psi}$ – потокоцепление статорной обмотки с магнитным полем ротора.

Тогда уравнение напряжения обмотки статора можно представить выражением

$$\vec{U} = \vec{I}R + L_s \cdot d\vec{I}/dt + \vec{\Psi}. \quad (3)$$

Перейдём от векторной формы записи к уравнениям напряжения, записанным в неподвижных статорных координатах α и β , совместив ось α с магнитной осью первой фазы. В результате получим систему уравнений:

$$\begin{aligned} u_\alpha &= i_\alpha R_s + L_s \cdot di_\alpha/dt + d\psi_\alpha/dt, \\ u_\beta &= i_\beta R_s + L_s \cdot di_\beta/dt + d\psi_\beta/dt, \end{aligned} \quad (4)$$

где u_α , u_β , i_α , i_β , ψ_α и ψ_β – скалярные значения напряжений, токов и потокоцепления обмотки ротора по осям α и β , которые могут быть получены путём

* Работа выполнена при поддержке ФГБОУ «Российский фонд фундаментальных исследований» в рамках договора № НК 14-07-00514\14 от 10.02.2014.

известных координатных преобразований по измеренным мгновенным значениям фазных напряжений и токов, R_s – активное сопротивление статора.

Разрешим уравнения (4) относительно потокосцепления обмотки ротора, получим мгновенные значения его проекций на оси α и β :

$$\begin{aligned}\psi_\alpha &= \int (u_\alpha - i_\alpha R_s) dt - i_\alpha L_s, \\ \psi_\beta &= \int (u_\beta - i_\beta R_s) dt - i_\beta L_s.\end{aligned}\quad (5)$$

Примем форму ЭДС двигателя синусоидальной, тогда мгновенные значения проекций потокосцепления содержат информацию о действительном угловом положении оси намагниченности ротора φ_r относительно статорной оси α и могут быть записаны выражениями:

$$\psi_\alpha = \Psi_m \cos \varphi_r, \quad \psi_\beta = \Psi_m \sin \varphi_r, \quad (6)$$

где Ψ_m – модуль потокосцепления обмотки ротора с магнитным полем статора, φ_r – действительное угловое положение оси намагниченности ротора.

Учитывая, что Ψ_m есть величина постоянная и определяется обмоточными данными статорной обмотки и намагниченностью ротора, оценку углового положения последнего определим из выражения

$$\varphi = \arctg(\psi_\beta/\psi_\alpha), \quad (7)$$

где φ – оценка углового положения оси намагниченности ротора.

Для исключения длительного переходного процесса при включении бездатчикового электропривода, интеграторы вычислителя мгновенных значений проекций вектора потокосцепления (5) охватывают неглубокой отрицательной обратной связью [3] (замещают их апериодическими звеньями первого порядка с большой постоянной времени):

$$\begin{aligned}\psi_\alpha &= (u_\alpha - i_\alpha R_s)/s - i_\alpha L_s \approx \\ &\approx (u_\alpha - i_\alpha R_s) \cdot T_\phi / (1 + T_\phi s) - i_\alpha L_s, \\ \psi_\beta &= (u_\beta - i_\beta R_s)/s - i_\beta L_s \approx \\ &\approx (u_\beta - i_\beta R_s) \cdot T_\phi / (1 + T_\phi s) - i_\beta L_s,\end{aligned}\quad (8)$$

где T_ϕ – постоянная времени апериодического звена первого порядка, s – оператор Лапласа.

Логарифмическая фазо-частотная характеристика (ЛФЧХ) апериодического звена меняется от 0° до требуемых -90° на протяжении двух декад. Поэтому при низких частотах вращения наблюдатель электрического угла поворота вала выдает оценку с соответствующим упреждением. Для первой итерации рекомендуется выбрать постоянную времени в соответствии с формулой

$$T_\phi = \frac{1}{\omega_n \cdot z_p \cdot D}, \quad (9)$$

где ω_n – максимальная частота тока статора, z_p – число пар полюсов, D – нижний предел диапазона регулирования скорости вала, который определен стремящимися к бесконечности в начале шкалы погрешностями измерения тока и регулирования питающего статор напряжения и равен (30...20), 10 – декада от частоты сопряжения участков.

Наблюдатель электрического угла поворота вала СДПМ для аналоговой системы управления

В случае отсутствия возможности вычислить функцию арктангенса [4] угол идентифицируют с помощью следящего контура фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) – специализированной системы автоматического регулирования, которая способна вести сопровождение входного сигнала (вектора потокосцепления) по фазе, подстраивая до совпадения фазу собственного управляемого генератора. Следящий контур ФАПЧ состоит из четырехквadrантного фазового детектора (преобразователя Парка), ПИ-регулятора и генератора управляемого напряжением. Мгновенные значения проекций вектора потокосцепления ψ_α и ψ_β являются аргументами для преобразования Парка:

$$\Psi_m = \text{Re}(\bar{\Psi}) = \psi_\alpha \cos \varphi + \psi_\beta \sin \varphi, \quad (10)$$

где Ψ_m – модуль потокосцепления.

Для обеспечения максимального момента необходимо, чтобы векторы статора и ротора были ортогональны ($\gamma = 0$). Для оценки отклонения от ортогональности векторов введём переменную χ , которая оценивает величину проекции вектора статора и определяется по выражению

$$0 \approx \chi = \text{Im}(\bar{\Psi}) = \psi_\beta \cos \varphi - \psi_\alpha \sin \varphi. \quad (11)$$

Модуль потокосцепления будет вычисляться безошибочно, если проекция вектора на мнимую ось вращающейся системы координат ($d-q$) будет равна нулю (что выполнится при совпадении действительного значения угла φ_r и его оценки φ). Выполнение условия ($\chi = 0$) отслеживает ПИ-регулятор, формирующий управляющий сигнал частоты ω для интегратора угла по уравнению

$$\omega = \chi \cdot K_p (1 + T_s \cdot s)/s, \quad (12)$$

$$T_s = \frac{L_s}{R_s}, \quad K_p \geq \frac{1}{T_s}.$$

Тогда оценка углового положения оси намагниченности ротора определяется следующим уравнением

$$\varphi = \omega \cdot (1/s). \quad (13)$$

Наблюдатель скорости и электрического угла поворота вала СДПМ с прецизионным следящим контуром ФАПЧ

Очевидно, что при линейном увеличении или снижении скорости, ошибка определения углового положения будет ненулевой. Предложим решение, позволяющее исправить это. Дополним систему управления наблюдателем скорости вала эквивалентного двигателя постоянного тока (ДПТ), который получим из уравнения напряжения по оси q вращающейся системы координат двигателя, при условии $\gamma = 0$ в виде

$$u_q \approx i_q \cdot R_s + L \frac{di_q}{dt} + e, \quad (14)$$

где $u_q = u_\beta \cos \varphi - u_\alpha \sin \varphi$,

$$i_q = i_\beta \cos \varphi - i_\alpha \sin \varphi, \quad e = \Psi_m \cdot \omega.$$

Откуда

$$\omega = \frac{u_q - i_q R_s \cdot (1 + T_s \cdot s)}{\Psi_m}, \quad (15)$$

где $T_s = L_s/R_s$ – постоянная времени двигателя, s – оператор Лапласа.

Выходной сигнал наблюдателя скорости необходимо подать на апериодическое звено с постоянной времени равной электромагнитной постоянной двигателя T_s , для получения устойчивой к шумам разностной вычислительной схемы. Оценка скорости искажится пренебрежимо мало, а операция дифференцирования измеряемого тока статора будет исключена:

$$\omega[n] \approx (U_q / (1 + T_s \cdot s) - I_q R_s) / (K_e / z_p), \quad (16)$$

где $\omega[n]$ – вычисленная угловая скорость с задержкой на период дискретизации.

Вычисленную угловую скорость с задержкой на период дискретизации контура тока (16) в соответствии с методом комбинированного управления, введём в контур идентификации электрического угла поворота вала, т. е. просуммируем с выходным сигналом ПИ-регулятора, которая определяется по уравнению:

$$\Delta\omega = \chi \cdot K_p (1 + T_s \cdot s) / s, \quad (17)$$

где $\Delta\omega$ – сигнал на выходе регулятора, K_p – коэффициент пропорционального канала ПИ-регулятора.

Тогда, оценка углового положения оси намагниченности ротора определяется следующим уравнением:

$$\varphi[n] \approx (\omega[n - 1] + \Delta\omega) \cdot (1/s). \quad (18)$$

Очевидно, что чем точнее будет идентифицирована скорость (15, 16), тем меньше будет сигнал на выходе регулятора (17). Данное решение позволяет устранить постоянную составляющую ошибки при линейном увеличении и уменьшении скорости. Для уменьшения величины ошибки слежения контур ФАПЧ может быть переведен в скользящий режим [5, 6]. Поэтому для замыкания контура скорости бездатчикового электропривода рекомендуется использовать выходную координату того же наблюдателя (16).

Восстановление и кэширование аргументов наблюдателя электрического угла поворота вала для релейно-векторного электропривода

Релейно-векторный электропривод (с прямым управлением моментом) отличается способом формирования питающего статор напряжения [2]. В соответствующей системе управления нет координат u_α , u_β , U_q . Их можно вычислить, зная напряжения на стойках моста u_A , u_B и u_C :

$$\begin{aligned} u_n &= (u_A + u_B + u_C) / 3, \quad u_u = u_A - u_n, \\ u_v &= u_B - u_n, \quad u_w = u_C - u_n, \\ u_\alpha &= u_u, \quad u_\beta = (u_v - u_w) / \sqrt{3} = \\ &= (u_u + u_v + u_w) / \sqrt{3}, \\ U_q &= u_\beta \cos \varphi - u_\alpha \sin \varphi. \end{aligned} \quad (19)$$

Поскольку в релейно-векторной системе управления вектор питающего статор напряжения принимает лишь шесть ненулевых значений фиксированной амплитуды, программа для микроконтроллера может кэшировать ортогональные координаты u_α , u_β в относительных единицах, в виде таблицы констант и приводить их к абсолютным значениям, используя в качестве базовой величины измеряемое напряжение шины постоянного тока U_{dc} .

Результаты численного эксперимента

Для проверки предложенных решений были построены математические модели (в программе Jigrein [7]) бездатчиковых электроприводов. Параметры двигателей приведены в таблице. На рис. 1, а представлены наблюдатель потокосцепления, на выходе которого оценка углового положения оси намагниченности ротора, ПИД-регулятор (s-PID), наблюдатель скорости эквивалентного ДТД, на выходе которого оценка скорости (Speed) и углового положения оси намагниченности ротора (Omega). Вышеупомянутые системы управления настроены так, чтобы привод обрабатывал типовую циклограмму (разгон с постоянным ускорением, стабилизация скорости $(0,1 \dots 1)\omega_n$, реверс с постоянным ускорением) с предельной для двига-

Параметры двигателей, использованных в численном эксперименте

Тип СДПМ	ДВМ100.021	ТУ4Н-105
Число пар полюсов, Z_p	13	4
Моментный коэффициент, K_t , Н·м/А	1.5·0.62	1.5·4.00
Момент инерции ротора двигателя, J , кг·м ²	2.0e-3	150e-3
Активное сопротивление двух секций статора, включенных последовательно, $2R$, Ом	2.5	6.4
Реактивное сопротивление двух секций статора включенных последовательно, $2L$, мГн	5.0	40
Номинальный ток, I_n , А	2.5	7.3
Номинальный момент, M_n , Н·м	2.0	38
Номинальная мощность, P_n , Вт	125	3k0
Отношение механической постоянной времени к электромагнитной постоянной времени, T_m/T_a	2.16	3.20

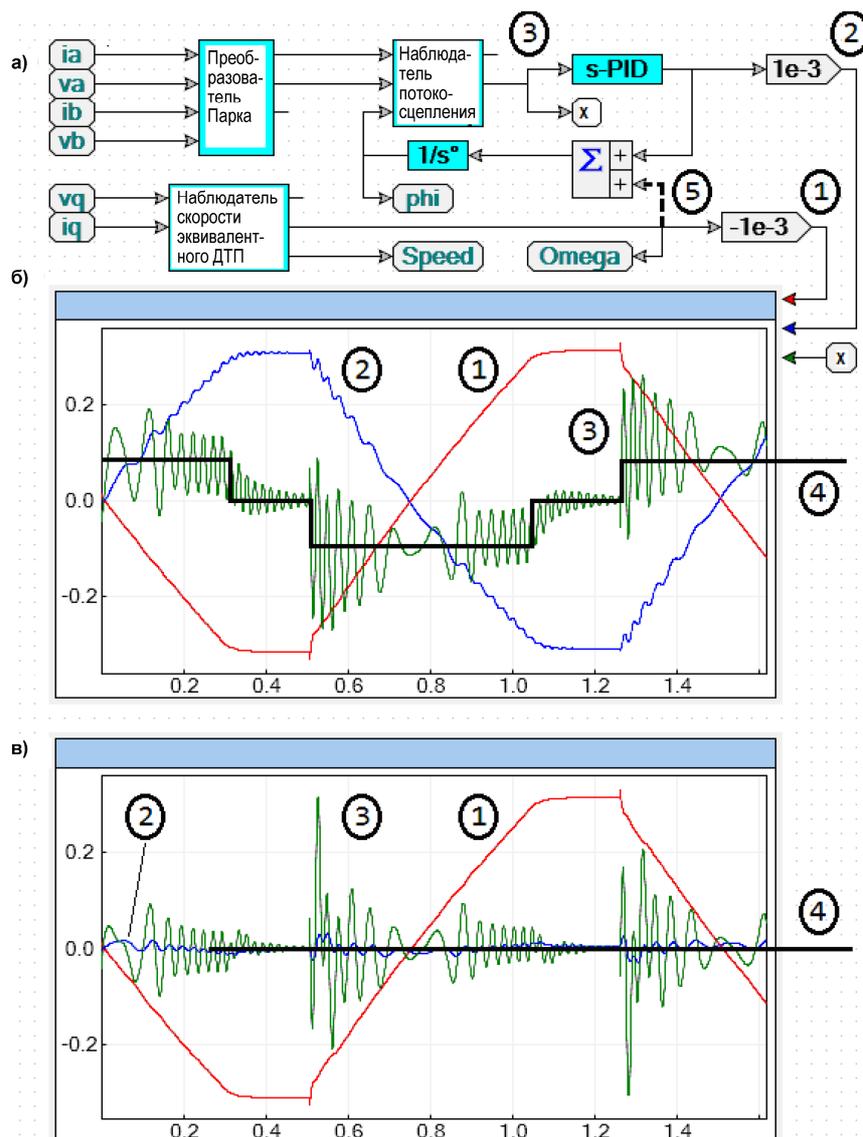


Рис. 1. Блок-схема модифицированного наблюдателя угла поворота вала СДПМ, дополненная наблюдателем скорости вала эквивалентного ДПТ

теля динамикой. Критерием качества служила осциллограмма момента, искажения которой не превышали 10 % от номинальной величины.

Результаты моделирования представлены на рис. 1, б, где 1 – оценка скорости наблюдателя скорости вала эквивалентного ДПТ, 2 – оценка скорости в следящем контуре идентификации электрического угла, 3 – осциллограмма ошибки (χ), 4 – постоянная составляющая ошибки.

Осциллограмма, представленная на рис. 1, в, демонстрирует устранение постоянной составляющей ошибки (4) в осциллограмме ошибки (3) контура ФАПЧ после включения канала комбинированного управления (линия связи 5).

Выводы

1. Включение канала комбинированного управления (подмешивание сигнала наблюдателя

скорости эквивалентного ДПТ) устраняет постоянную составляющую ошибки определения вектора потокосцепления.

2. Представленный наблюдатель электрического угла поворота вала электродвигателя (φ) по методу комбинированного управления без использования функции $\arctg \varphi$, позволяет реализовать векторное управление вентильного двигателя с меньшими по сравнению с другими известными методами объемом вычислительных ресурсов.

Литература

1. Driss Yousfi. *Efficient Sensorless PMSM Drive for Electric Vehicle Traction Systems* / Driss Yousfi, Elbacha Abdelhadi, Abdellah Ait Ouahman // *Electric Vehicles – Modelling and Simulations* / Dr. Seref Soylu (Ed.). – 2011. – <http://www.intechopen.com/books/electric-vehicles-modelling-and-simulations/efficient>

sensorless-pmsm-drive-for-electric-vehicle-traction-systems.

2. Воронин, С.Г. Векторное управление синхронными двигателями с возбуждением от постоянных магнитов / С.Г. Воронин, Д.А. Курносков, А.С. Кульмухаметова // *Электротехника*. – 2013. – № 10. – С. 50–54.

3. Виноградов, А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / А.Б. Виноградов. – Иваново: Иванов. гос. энергет. ун-т им. В.И. Ленина. – 2008. – 298 с.

4. Atmel AVR1636: Configurable PMSM Sensorless Field Oriented Control using the XMEGA / [APPLICATION NOTE] Rev.: 42061A–AVR–01/2013 // Atmel web site. – www.atmel.com/images/doc42061.pdf (дата обращения: 01.02.2014).

5. AN1078, Sensorless Field Oriented Control of

a PMSM (DS01078B) / Jorge Zambada, Debraj Deb // Microchip web site. – <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/01078B.pdf> (дата обращения: 01.02.2014).

6. Sensorless PMSM Vector Control with a Sliding Mode Observer for Compressors Using MC56F8013 / Document Number: DRM099, Rev.: 2-09/2008 // Freescale Semiconductor web site. – http://cache.freescale.com/files/microcontrollers/doc/ref_manual/DRM099.pdf (дата обращения: 01.02.2014).

7. Клиначёв, Н.В. Цифровые управляющие системы для электропривода: фрагменты учебного курса. 2011–2013 гг. / Н.В. Клиначёв // Моделирующая программа Jigrein: Теория, программа, руководство, модели. 2006–2014 гг. – http://model.exponenta.ru/k2/Jigrein/dcs_knv.htm (дата обращения: 01.02.2014).

Клиначев Николай Васильевич, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электромеханики и электромеханических систем», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; klinacherv_nv@mail.ru.

Кулева Надежда Юрьевна, аспирант кафедры «Электромеханики и электромеханических систем», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; nadezhda.kuleva@mail.ru.

Воронин Сергей Григорьевич, д-р техн. наук, профессор кафедры «Электромеханики и электромеханических систем», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; voroninsg@susu.ac.ru.

Поступила в редакцию 26 марта 2014 г.

**Bulletin of the South Ural State University
Series "Power Engineering"
2014, vol. 14, no. 2, pp. 49–54**

ROTOR POSITION ESTIMATION FOR PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR

N.V. Klinachev, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,
klinacherv_nv@mail.ru,

N.Yu. Kuleva, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,
nadezhda.kuleva@mail.ru,

S.G. Voronin, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,
voroninsg@susu.ac.ru

The paper describes rotor position observer for permanent magnet synchronous motor, consisting of calculator of flux vector projections on the axis of the fixed coordinate system $\alpha\text{-}\beta$ and loop tracking this vector by phase (phase-locked loop, referred to as PLL). It is shown that in the electric drive motion modes with constant acceleration the loop tracking error has a DC component. To eliminate it the usage of combined control method is proposed. The reference signal for integrator circuit (in the PLL circuit for VCO) is provided by output coordinate of the equivalent DC motor speed estimator. PI controller compensates small deviations in the tracking loop. Modified observer does not disturb the sliding mode of tracking loop. Outside shaft speed estimator allows to close drive speed loop while preserving the motor dynamics on its maximum.

Keywords: electric drive, sensorless, vector, relay-vector, estimator, PLL, FOC, DTC, PMSM, BLAC Motor, modeling in Jigrein4WEB.

References

1. Driss Yousfi, Abdelhadi Elbacha and Abdellah Ait Ouahman (2011). Efficient Sensorless PMSM Drive for Electric Vehicle Traction Systems, *Electric Vehicles – Modelling and Simulations*, Dr. Seref Soylu (Ed.), InTech, Available at: <http://www.intechopen.com/books/electric-vehicles-modelling-and-simulations/efficient-sensorless-pmsm-drive-for-electric-vehicle-traction-systems>.
2. Voronin S.G., Kurnosov D.A., Kul'mukhametova A.S. Vector Control of Permanent-Magnet Synchronous Motors, *Russian Electrical Engineering*, 2013, vol. 84, iss. 10, pp. 581–585.
3. Vinogradov A.B. *Vektornoe upravlenie jelectroprivodami peremennogo toka* [Field oriented control for alternating current electrical drives]. Ivanovo, Ivanovo State Power University named after V.I. Lenin Publ., 2008. 298 p.
4. Atmel AVR1636: Configurable PMSM Sensorless Field Oriented Control using the XMEGA [APPLICATION NOTE] Rev.: 42061A–AVR–01/2013 Available at: www.atmel.com/images/doc42061.pdf. Accessed: 01.02.2014.
5. AN1078, Sensorless Field Oriented Control of a PMSM (DS01078B) Jorge Zambada, Debraj Deb. Microchip web site. Available at: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/01078B.pdf>. Accessed: 01.02.2014.
6. Sensorless PMSM Vector Control with a Sliding Mode Observer for Compressors Using MC56F8013 Document Number: DRM099, Rev.:2-09/2008 // Freescale Semiconductor web site. Available at: http://cache.freescale.com/files/microcontrollers/doc/ref_manual/DRM099.pdf. Accessed: 01.02.2014.
7. Klinachev N.V. Digital control systems for electric drive: fragments of the training course, 2011–2013. *Simulation program Jigrein: Theory, program, user's guide, models*, 2006–2014. Available at: http://model.exponenta.ru/k2/Jigrein/dcs_knv.htm. Accessed: 01.02.2014.

Received 26 March 2014