

# РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ БЕЗДАТЧИКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ РОТОРА СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВАНИИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО СИГНАЛА ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

*К.В. Лицин, Т.В. Ковальчук*

*Новотроицкий филиал НИТУ «МИСиС», г. Новотроицк, Оренбургская обл., Россия*

Рассматривается возможность реализации метода бездатчикового определения углового положения ротора. Проанализированы существующие методы бездатчикового контроля углового положения ротора двигателей переменного тока. Представлены общие недостатки ряда бездатчиковых методов. Указано, что одна из главных проблем определения углового положения ротора без использования механического датчика заключается в сложности определения данной величины при нулевой и низкой скорости. Представлена функциональная схема бездатчикового электропривода на основе синхронного двигателя. Рассмотрена взаимосвязь наводимых ЭДС и высокочастотного сигнала напряжения, подаваемого в обмотку возбуждения синхронного двигателя. Осуществлен вывод формулы, описывающей зависимость между угловым положением ротора и фазными ЭДС. Вывод формулы осуществлен на основе системы уравнений Парка – Горева. Реализована структурная схема согласно приведенным зависимостям. Выполнен анализ полученных результатов.

*Ключевые слова: синхронный двигатель, высокочастотный сигнал, угловое положение ротора, наблюдатель состояния, электродвижущая сила.*

## Введение

Развитие электропривода приводит к необходимости решения проблем, связанных с его массогабаритными параметрами [1–3]. Одним из возможных способов, позволяющих добиться положительного результата в этом направлении, является отказ от использования механических датчиков [4–8]. С другой стороны, обойтись без величины углового положения невозможно, поэтому предлагается определять её с помощью косвенных показателей, которыми являются величины напряжения или тока электропривода.

Кроме отмеченного уменьшения габаритных показателей бездатчиковые способы определения углового положения также позволяют добиться таких преимуществ, как:

- уменьшение стоимости системы электропривода;

- увеличение надежности электропривода.

Согласно [9] векторное управление двигателем переменного тока приводит к необходимости определения угловой величины на трёх этапах:

- начальное положение ротора;

- величина угловой скорости (положения) в диапазоне скорости двигателя, не превышающем 10 % от номинального значения;

- номинальный режим работы [10].

В работах [11–18] угловое положение ротора определяется на основе оценивающих моделей. Внедрение подобных решений обусловлено для электроприводов с небольшим диапазоном регулирования скорости (не более 1 : 100) [11–16], либо при невозможности установки датчика на двигатель по причине нехватки места [17, 18].

Недостатки оценивающих моделей заключаются в следующем:

- разработанные наблюдатели состояния (Калмана, Люенбергера и др.) не позволяют отслеживать угловое положение ротора во всем диапазоне частот;

- в диапазоне низких скоростей величина погрешности углового положения может достигать значительной величины, так как необходимо учитывать поправку на «мертвое время» и время задержки переключения ключей инвертора;

- вариации активного сопротивления, взаимной индукции двигателя переменного тока при его работе под воздействием температуры вносят погрешность в расчеты наблюдателей состояния по определению углового положения ротора.

В работе [19] авторами данной статьи была предложена упрощенная классификация всех бездатчиковых методов определения углового положения. Предложено выделить две группы определения углового положения ротора без использования механического датчика:

- на основе противоЭДС;

- на основе измерения индуктивности фазы статора.

В работе [20] рассмотрены преимущества, недостатки и ограничения каждого из методов, относящихся к двум выделенным категориям. Основным недостатком рассмотренных бездатчиковых систем заключается в невозможности определения углового положения при нулевой и низкой, не превышающей 10 % от номинальной, скорости.

Целью данной статьи является теоретическое обоснование методики определения углового по-

ложения ротора синхронного двигателя с помощью подачи сигнала высокой частоты в обмотку возбуждения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– проанализировать взаимосвязь углового положения ротора с величинами ЭДС, наводимых на обмотке статора;

– разработать структурную схему определения углового положения ротора;

– проанализировать полученные результаты величины углового положения ротора в области нулевой и низкой скорости.

### Теоретическое обоснование метода определения углового положения ротора синхронного двигателя с помощью инъекции высокочастотного сигнала

Функциональная схема электропривода с бездатчиковым определением углового положения ротора на основе подачи сигнала высокой частоты в обмотку возбуждения представлена на рис. 1.

Сигнал высокой частоты (в работе [19] доказана величина в 1000 Гц) подается в обмотку возбуждения синхронного двигателя. В обмотках статора наводятся ЭДС. Выделение высокочастотной составляющей сигнала напряжения ( $U_{af}$ ,  $U_{bf}$ ,  $U_{cf}$ ) происходит с помощью полосно-пропускающих фильтров (ППФ). В блоке определения углового положения ротора осуществляется процесс сравнения выделенных сигналов напряжения и сравнение их с переменной составляющей сигнала возбуждения ( $U_f$ ). Вычисленный сигнал поступает в блок преобразователя частоты для реализации векторного управления синхронным двигателем.

В работе [17] предлагается схема определения углового положения ротора, позволяющая определять искомую величину с точностью в  $30^\circ$ .

Чаще всего подобной точности недостаточно для того, чтобы реализовать векторное управление двигателем переменного тока. Поэтому актуальным является анализ зависимости

углового положения от величин напряжений на статоре  $\theta = f(U_a, U_b, U_c)$ .

Процесс вывода данного выражения начнем с записи уравнений Парка – Горева для синхронной машины [21, 22]:

$$\frac{d\Psi_d}{dt} + \omega\Psi_q + r_i i_d = -u_d; \quad (1)$$

$$\omega\Psi_d - \frac{d\Psi_q}{dt} - r_i i_q = u_q; \quad (2)$$

$$\frac{d\Psi_r}{dt} + r_r i_r = E_r; \quad (3)$$

$$\frac{d\Psi_{rdi}}{dt} + r_{rdi} i_{rdi} = 0, \quad i = 0 \dots n_d; \quad (4)$$

$$\frac{d\Psi_{rjk}}{dt} + r_{rjk} i_{rjk} = 0, \quad k = 0 \dots n_q; \quad (5)$$

$$\Psi_d = L_d i_d + M_{ad} i_r + M_{ad} \sum_{i=1}^{n_d} i_{rdi}; \quad (6)$$

$$\Psi_q = L_q i_q + M_{aq} \sum_{k=1}^{n_q} i_{rjk}; \quad (7)$$

$$\Psi_r = L_r i_r + \frac{3}{2} M_{ad} i_d + M_{ad} \sum_{i=1}^{n_d} i_{rdi}; \quad (8)$$

$$\Psi_{rdi} = L_{rdi} i_{rdi} + \frac{3}{2} M_{ad} i_d + M_{ad} i_r + M_{ad} \sum_{j=1, j \neq i}^{n_d} i_{rdij}, \quad i = 0 \dots n_d; \quad (9)$$

$$\Psi_{rjk} = L_{rjk} i_{rjk} + \frac{3}{2} M_{aq} i_q + M_{aq} \sum_{j=1, j \neq k}^{n_q} i_{rjk}, \quad k = 0 \dots n_q; \quad (10)$$

$$J \frac{d\Omega}{dt} = M_T - \frac{3}{2} (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d), \quad (11)$$

где  $r$ ,  $r_r$ ,  $r_{di}$ ,  $r_{dk}$  – активное сопротивление обмотки статора, обмотки возбуждения  $i$ -го продольного и  $k$ -го поперечного демпферных контуров;

$L_d$ ,  $L_q$  – индуктивности обмотки статора;

$L_r$ ,  $L_{rdi}$ ,  $L_{rdk}$  – индуктивности обмотки возбуждения;

$M_{ad}$  – взаимная индуктивность в оси  $d$ ;

$M_{aq}$  – взаимная индуктивность в оси  $q$ ;

$E_r$  – напряжение возбуждения;

$\Omega = \omega/p$  – угловая скорость вращения ротора;

$P$  – число пар полюсов машины.

В качестве начального условия будем рассматривать случай, при котором статор синхронного двигателя не подключен к трехфазной сети переменного тока. Следовательно, в обмотках статора не будет фазных токов. При подобных рассуждениях можно значительно упростить уравнения

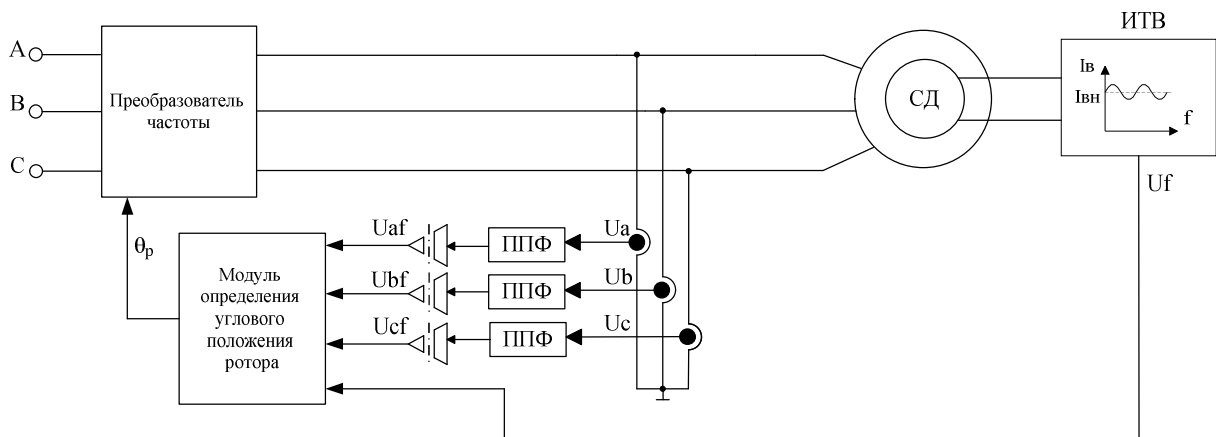


Рис. 1. Функциональная схема электропривода с бездатчиковым определением углового положения ротора

## Электромеханические системы

(1)–(11). Определить величину проекции напряжения на ось  $q$ :

$$U_q = R_s i_q + \frac{d}{dt} \varphi_q - \omega_R \omega_d. \quad (12)$$

На основании начальных условий

$$U_q = 0. \quad (13)$$

Из формулы преобразования координат известно, что

$$u_q = \frac{3}{2} \left( u_a \cos(\theta) + u_b \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + u_c \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right), \quad (14)$$

где  $u_a$ ,  $u_b$ ,  $u_c$  – мгновенные значения фазных напряжений.

Подставив выражение (14) в (13), учитывая симметричность трехфазной системы, а так же формулы сложения косинусов, получим

$$\frac{\sqrt{3}}{2} u_a \sin\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) + \frac{\sqrt{3}}{2} u_b \sin(\theta) = 0. \quad (15)$$

Запишем выражение (15) в виде:

$$\frac{\sin\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right)}{\sin(\theta)} = -\frac{u_b}{u_a}. \quad (16)$$

Отношение  $U_a/U_b$  примем равным  $k$ . Выражение (16) может быть упрощено согласно формуле

приведения. На основании этого получено выражение

$$\frac{\sin\theta \cos\frac{\pi}{3} + \cos\theta \sin\frac{\pi}{3}}{\sin\theta} = -\frac{1}{k}. \quad (17)$$

Разделим поочередно левую часть уравнения (17) на  $\sin\theta$ . В результате получим

$$0,5 + 0,866 \operatorname{ctg}\theta = -\frac{1}{k}. \quad (18)$$

Выразим из выражения (18) величину  $\operatorname{ctg}\theta$ , получим

$$\operatorname{ctg}\theta = \frac{\frac{1}{k} - 0,5}{0,866}. \quad (19)$$

Окончательный результат приведем к виду

$$\theta = \operatorname{arctg}\left(\frac{-0,866}{\frac{1}{k} + 0,5}\right) + 180n, \quad (20)$$

где  $n$  – величина, равная 0, 1 или 2 в зависимости от положения ротора.

Коэффициент  $n$  необходимо использовать по причине наличия в формуле (20) функции  $\operatorname{arctg}$ .

На основании формулы (20) была проведена модернизация схемы, представленной в [17]. Улучшенная структурная схема модуля определения углового положения ротора представлена на рис. 2.

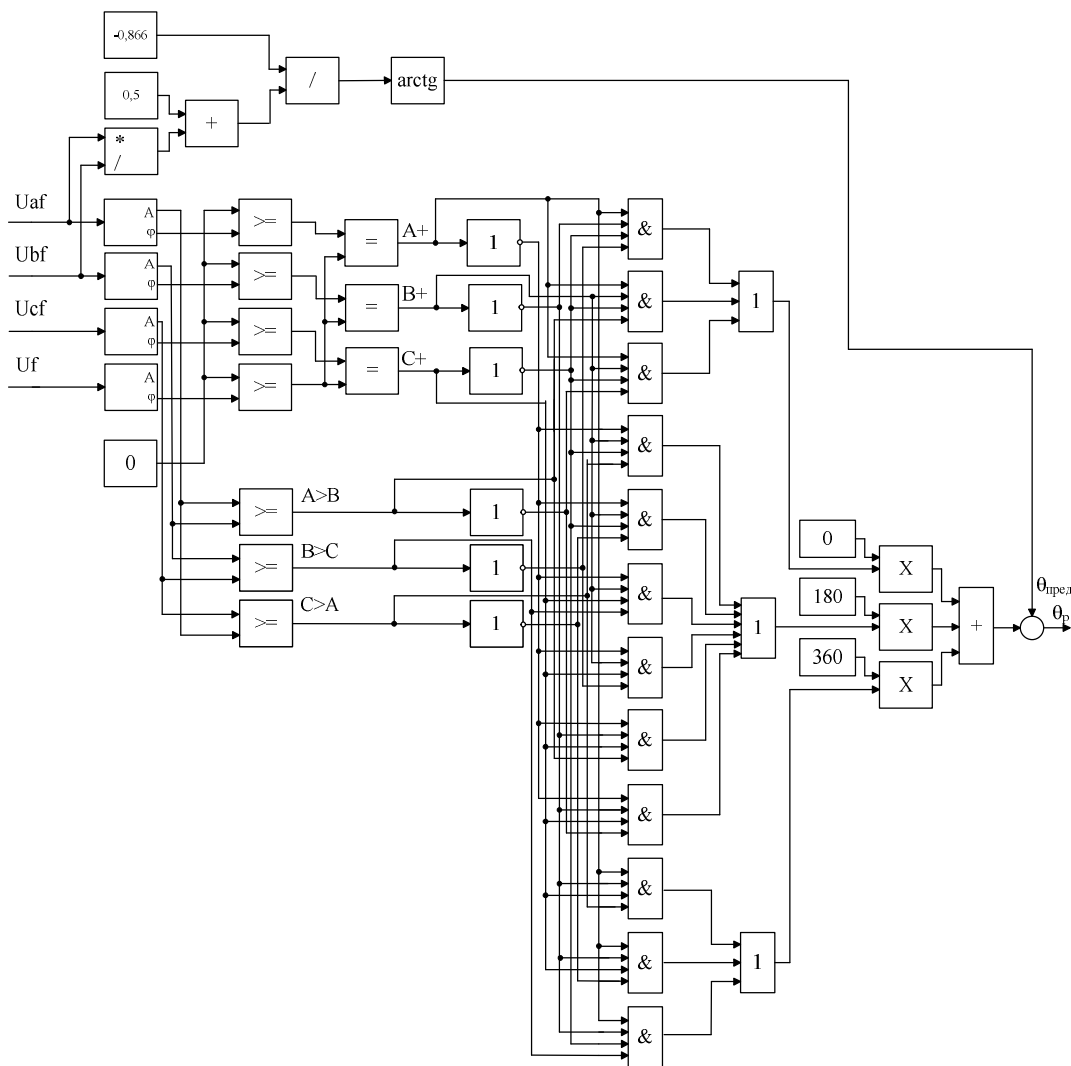


Рис. 2. Структурная схема модуля определения углового положения ротора

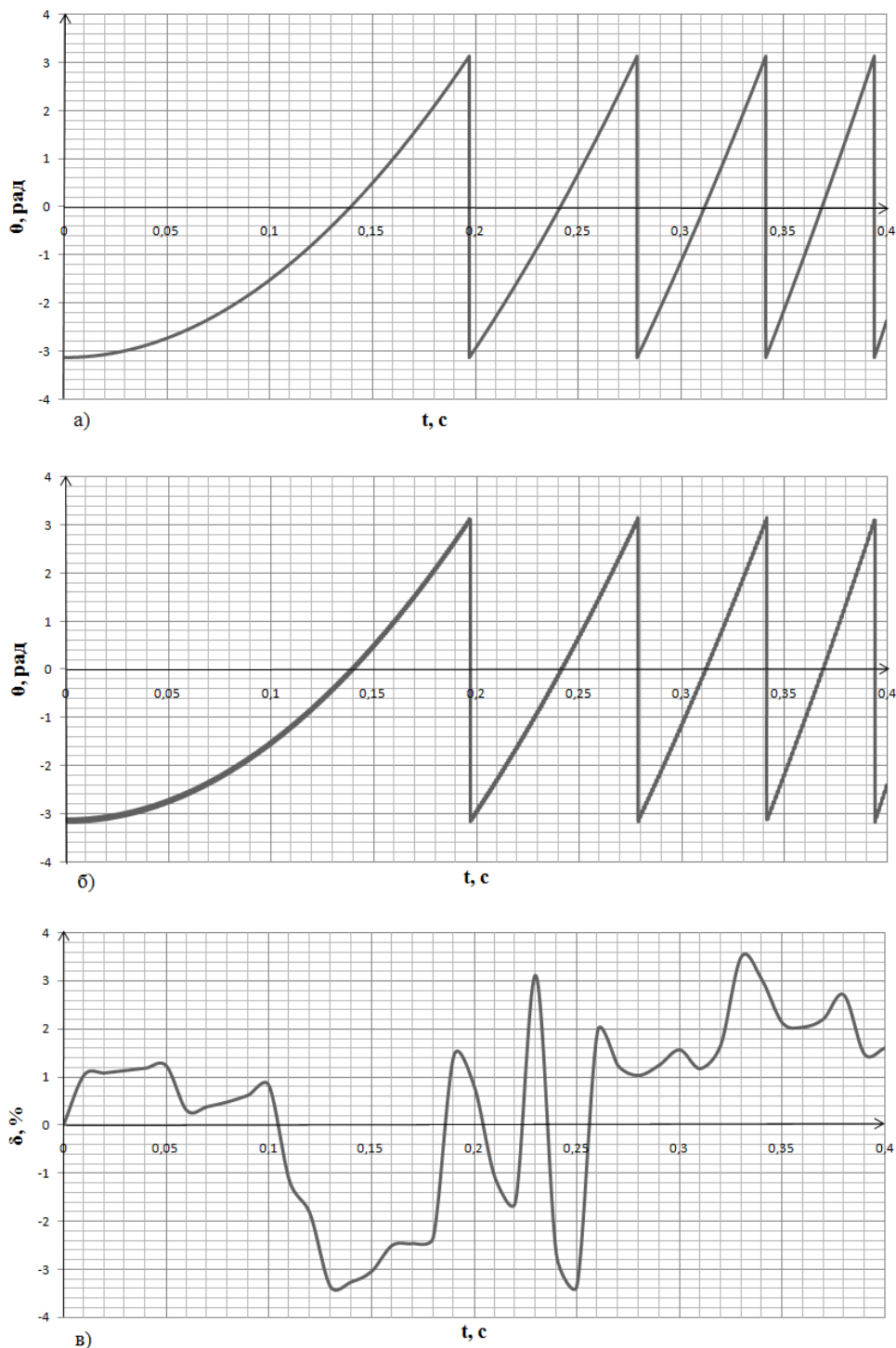


Рис. 3. Сравнение углового положения ротора: а – график изменения углового положения ротора в бездатчиковой системе; б – график изменения углового положения ротора в электроприводе с механическим датчиком; в – график относительной погрешности

Проверка работоспособности электропривода с бездатчиковым определением углового положения ротора была осуществлена за счет сравнения угловой величины, полученной в бездатчиковой модели (рис. 3а), и угловой величины в аналогичном электроприводе с механическим датчиком (рис. 3б). Обе модели разработаны на основе

функциональной схемы (см. рис. 1) в программе MATLAB Simulink.

#### Вывод

В результате проведенного анализа бездатчиковых методов определения углового положения ротора двигателей переменного тока выявлено, что

они обладают одним общим недостатком, который связан с трудностью определения угловой величины при низких и нулевых скоростях. В статье дано теоретическое обоснование метода определения угловой величины на основе подачи сигнала высокой частоты в обмотку возбуждения ротора синхронного двигателя. Осуществлён вывод выражения, обуславливающего зависимость углового положения ротора от наводимых в статоре высокочастотных составляющих ЭДС. На основе предложенного выражения разработана модель электропривода, анализ которой показал, что величина погрешности предложенного метода при сопоставлении с параметром углового положения, измеренного с помощью механического датчика, не превышает 3,8 %.

### Литература

1. Басков, С.Н. Применение векторно-импульсного способа для пуска двигателей переменного тока / С.Н. Басков, А.А. Радионов, А.Б. Святых // *Электротехника*. – 2013. – № 10. – С. 30–34.
2. Виноградов, А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / А.Б. Виноградов. – Иваново: ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», 2008. – 298 с.
3. Валов, А.В. Импульсно-векторное управление асинхронным двигателем с фазным ротором / А.В. Валов, Ю.С. Усынин // 12-я Международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых. – 2008. – С. 20–24.
4. Baskov, S.N. Vector-pulse control principle of ac motors / S.N. Baskov, K.V. Litsin // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика»*. – 2013. – Т. 13, № 1. – С. 92–95.
5. Jang, J.-H. Sensorless drive of SMPM motor by high frequency signal injection / J.-H. Jang, S.-K. Sul. – 2002. – 203 p.
6. Куксин, А.В. Математическая модель адаптивно-векторной системы управления бездатчикового асинхронного электропривода / А.В. Куксин, А.В. Романов // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. – 2009. – Т. 5, № 11. – С. 85–87.
7. Виноградов, А.Б. Адаптивно-векторная система управления бездатчикового асинхронного электропривода ЭПВ / А.Б. Виноградов, И.Ю. Коллодин, А.Н. Сибирицев // *Силовая электроника*. – 2006. – С. 50–55.
8. Басков, С.Н. Моделирование системы с промежуточными трансформаторами при векторно-импульсном пуске двигателя переменного тока / С.Н. Басков, К.В. Лицин // *Электротехнические системы и комплексы*. – 2014. – № 2 (23). – С. 32–35
9. Perera, P.D.C. Sensorless Control of Permanent-Magnet Synchronous Motor Drives. PhD thesis / P.D.C. Perera. – Institute of Energy Technology Aalborg University, 2002. – 98 p.
10. Чалуна, Л.В. Системы управления электроприводами на микроконтроллерах фирмы Motorola / Л.В. Чалуна // *Chip News*. – 1999. – № 1.
11. Гончаров, А.С. Анализ современного состояния в области состояния электроприводов с бездатчиковым управлением и методов построения САР в условиях ограниченной информации о векторе состояния / А.С. Гончаров, В.А. Поваляев, С.И. Миронов // *Электротехнические комплексы и системы управления*. – 2008. – № 1. – С. 13–16.
12. Xia Changliang. Sensorless position control of a brushless dc motor based on disturbance observer / Xia Changliang // *China Electrotech*. – 2002. – No. 6. – P. 25–28.
13. Сизякин, А.Е. Без датчика положения ротора: решения компании IR для управления ВЭП / А.Е. Сизякин, М.Б. Румянцев // *Новости электроники*. – 2011. – № 10. – С. 22–28.
14. Панкратов, В.В. Тенденции развития общепромышленных электроприводов переменного тока на основе современных устройств силовой электроники / В.В. Панкратов // *Силовая интеллектуальная электроника. Специализированный информационно-аналитический журнал*. – 2005. – № 2. – С. 27–31.
15. Корельский, Д.В. Обзор современных методов управления синхронными двигателями с постоянными магнитами / Д.В. Корельский, Е.М. Потапенко, Е.В. Васильева // *Научный журнал «Радиоэлектроника. Информатика. Управление»*. – 2001. – № 3. – С. 155–159.
16. Новиков, Ю.Д. Экспериментальное определение индуктивности рассеяния асинхронных двигателей / Ю.Д. Новиков, З.И. Гентковски, Ю.В. Бабин // *Электротехника*. – 1982. – № 3. – С. 40–41.
17. Persson, Jan. Innovative standstill position detection combined with sensorless control of synchronous motors / Jan Persson. – Lausanne, Switzerland, École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), 2005. – 142 p.
18. Baskov, S.N. Determination of the angular position of the rotor of a synchronous motor by connecting a high-frequency signal in the excitation winding / S.N. Baskov, K.V. Litsin // *International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 – Proceedings*. – 2015. – С. 7146993. DOI: 10.1109/sibcon.2015.7146993
19. Sun Don. Direct torque control of a permanent magnet synchronous motor based on fuzzy logic / Sun Don // *China Electrotech*. – 2003. – No. 1. – P. 33–38.
20. Baskov, S.N. Research of vector-pulse start system of synchronous motor with intermediate transformer and sensorless determination of angular rotor position with mathematical methods / S.N. Baskov,

K.V. Litsin // 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2016 – Proceedings. DOI: 10.1109/icieam.2016.7910955

21. Басков С.Н. Определение углового положения ротора синхронного двигателя в режиме

векторно-импульсного пуска / С.Н. Басков, К.В. Лицин, А.А. Радионов // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2014. – № 4. – С. 3–8.

22. Горев, А.А. Переходные процессы синхронной машины / А.А. Горев. – М.: Госэнергоиздат, 1950. – 290 с.

**Лицин Константин Владимирович**, канд. техн. наук, доцент, Новотроицкий филиал НИТУ «МИСиС», г. Новотроицк, Оренбургская обл.; k.litsin@rambler.ru.

**Ковальчук Татьяна Владимировна**, студент, Новотроицкий филиал НИТУ «МИСиС», г. Новотроицк, Оренбургская обл.; tvlkovalchuk@gmail.com.

Поступила в редакцию 15 мая 2019 г.

DOI: 10.14529/power190312

## ADDITIONAL HIGH-FREQUENCY SIGNAL FOR SENSORLESS ANGULAR POSITIONING OF THE ROTOR IN SYNCHRONOUS MOTORS

K.V. Litsin, k.litsin@rambler.ru,  
T.V. Kovalchuk, tvlkovalchuk@gmail.com

Novotroitsk branch of the National University of Science and Technology "MISIS",  
Orenburg region, Novotroitsk, Russian Federation

This is a feasibility test for sensorless angular rotor positioning. The paper analyzes the existing methods for sensorless control of angular rotor position in AC motors. It identifies their common drawbacks, one of which is that angular rotor position is difficult to determine at low or zero rotor speed unless a mechanical sensor is in use. The paper presents the functional diagram of a sensorless electric drive based on a synchronous motor. It considers the correlation of induced EMF and high-frequency voltage signal fed to the SM excitation winding. The paper further derives a formula to describe the angular rotor position as a function of phase EMF. The derivation is based on Park-Gorev equations. The obtained dependencies are used in an implemented structural diagram, with the research output being discussed in detail.

*Keywords:* synchronous motor, high frequency signal, rotor angular position, state observer, electromotive force.

### References

1. Baskov S.N., Radionov A.A., Svyatykh A.A. [The use of vector-pulse method for starting AC motors]. *Russian Electrical Engineering*, 2013, no. 10, pp. 30–34. (in Russ.)
2. Vinogradov, A.B. *Vektornoe upravlenie elektroprivodami peremennogo toka* [Vector control of AC drives], Ivanovo, SEI HPE Ivanovo State Power Engineering University, 2008. 225 p.
3. Valov A.V., Usynin Yu.S. [Pulse-vector control of an asynchronous motor with a phase rotor]. *12-ya Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya studentov i molodykh uchenykh* [12th International Scientific and Practical Conference of Students and Young Scientists], 2008, pp. 20–24. (in Russ.)
4. Baskov S.N., Litsin K.V. [Vector-pulse control principle of ac motors]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2013. vol. 13, no. 1, pp. 92–95. (in Russ.)
5. Jang J.-H., Sul S.-K. [Sensorless drive of SMPM motor by high frequency signal injection], 2002. 203 p.
6. Kuksin A.V., Romanov A.V. [Mathematical model of the adaptive vector control system of a sensorless asynchronous electric drive]. *Bulletin of the Voronezh State Technical University*, 2013, vol. 5, no. 11, pp. 85–87. (in Russ.)
7. Vinogradov A.B., Kolodin Yu., Sibirtsev A.N. [Adaptive-vector control system of an EPV sensorless asynchronous electric drive]. *Silovaya elektronika*, 2006, pp. 50–55. (in Russ.)

8. Baskov S.N., Litsin K.V. [Simulation of a system with intermediate transformers with a vector-pulse start-up of an AC motor]. *Electrotechnical Systems and Complexes*, 2014, no. 2 (23), pp. 32–35. (in Russ.)
9. Perera P.D.C. *Sensorless Control of Permanent-Magnet Synchronous Motor Drives*. PhD thesis. Institute of Energy Technology Aalborg University, 2002. 98 p.
10. Chalupa L.V. [Motor control systems on Motorola microcontrollers]. *Chip News*, 1999, no. 1.
11. Goncharov A.S., Povalyaev V.A., Mironov S.I. [Analysis of the current state in the field of the state of electric drives with sensorless control and methods for constructing ATS conditions of limited information about the state vector]. *Electrotechnical Complexes and Control Systems*, 2008, no. 1, pp. 13–16. (in Russ.)
12. Xia Changliang. Sensorless position control of a brushless dc motor based on disturbance observer. *China Electrotech.*, 2002, no. 6, pp. 25–28.
13. Sizyakin A.E., Rumyantsev M.B. [Without rotor position sensor: IR company solutions for VEP control]. *Electronics News*, 2011, no. 10, pp. 22–28. (in Russ.)
14. Pankratov, V.V. [Development trends of common industrial electric drives of alternating current based on modern power electronics devices]. *Power Intelligent Electronics. Specialized Information and Analytical Magazine*, 2005, no. 2, pp. 27–31. (in Russ.)
15. Korel'skiy, D.V., Potapenko E.M., Vasil'eva E.V. [An overview of modern non-chronical permanent magnet drive control techniques]. *Scientific magazine "Radioelektronika. Informatics. Upravlinnya"*, 2001, no. 3, pp. 155–159.
16. Novikov Yu.D., Gentkovski Z.I., Babin Yu.V. [Experimental determination of leakage inductance of asynchronous motors]. *Russian Electrical Engineering*, 1982, no. 3, pp. 40–41. (in Russ.)
17. Jan Persson. *Innovative standstill position detection combined with sensorless control of synchronous motors*. Lausanne, Switzerland, École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), 2005. 142 p.
18. Baskov S.N., Litsin K.V. [Determination of the angular position of the rotor of a synchronous motor by connecting a high-frequency signal in the excitation winding]. *International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 – Proceedings*, 2015. P. 7146993. DOI: 10.1109/sibcon.2015.7146993
19. Sun Don. Direct torque control of a permanent magnet synchronous motor based on fuzzy logic. *China Electrotech*, 2003, no. 1, pp. 33–38.
20. Baskov, S.N., Litsin, K.V. [Research of vector-pulse start system of synchronous motor with intermediate transformer and sensorless determination of angular rotor position with mathematical methods]. *2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2016 – Proceedings*. DOI: 10.1109/icieam.2016.7910955
21. Baskov S.N., Litsin K.V., Radionov A.A. [Determination of the angular position of the rotor of a synchronous motor in the vector-pulse start mode]. *Conduct Universities of Chernozem*, 2014, no. 4, pp. 3–8 (in Russ.)
22. Gorev, A.A. *Perekhodnye protsessy sinkhronnoy mashiny* [Transient synchronous machine]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1950. 290 p.

Received 15 May 2019

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Лицин, К.В. Разработка методики бездатчикового определения углового положения ротора синхронного двигателя на основании дополнительного сигнала высокой частоты / К.В. Лицин, Т.В. Ковальчук // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 108–114. DOI: 10.14529/power190312

### FOR CITATION

Litsin K.V., Kovalchuk T.V. Additional High-Frequency Signal for Sensorless Angular Positioning of the Rotor in Synchronous Motors. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 108–114. (in Russ.) DOI: 10.14529/power190312