

Сравнительный анализ известных способов бездатчикового определения углового положения ротора асинхронного двигателя

Лицин К.В., Симидоцкий А.Е.
Новотроицкий филиал НИТУ «МИСиС»
г. Новотроицк, Российская Федерация
k.litsin@rambler.ru, simidockii.1996@mail.ru

Аннотация. Проанализировано влияние механического датчика на работу электропривода. Рассмотрена технология бездатчикового определения углового положения ротора асинхронного двигателя. Проанализированы достоинства и недостатки подобных систем, относительно систем, использующих механический датчик. Среди достоинств использования бездатчиковых систем отмечено следующее: низкая стоимость, компактность и надёжность. Проанализированные методы бездатчикового определения углового положения ротора позволили выявить недостатки, которые связаны со сложностью определения углового положения ротора при нулевой и низкой частоте. Подробно рассмотрен способ решения данной проблемы.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, бездатчиковая система, инжекция, низкая частота, надёжность.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время вопрос бездатчикового определения углового положения ротора является достаточно актуальным [1-5]. Возможность нахождения величины углового положения ротора синхронного двигателя позволяет добиться таких преимуществ, как:

- снижение стоимости системы;
- повышение надёжности и способа управления электроприводом;
- уменьшение массогабаритных показателей системы [6].

Одним из основных способов определения углового положения является применение оценивающей модели, которая позволяет использовать систему электропривода в технологических условиях невозможности применения датчика угла поворота.

Однако бездатчиковые системы управления электроприводом не лишены недостатков:

- применение наблюдателя состояния, который используется в большинстве бездатчиковых систем, ограничено диапазоном частоты, т.е. невозможно определить величину углового положения ротора при нулевых и низких частотах, т.к. отсутствует необходимая информация величине тока и напряжения;
- в ходе эксплуатации электродвигателя под влиянием внешних условий изменяются его активные сопротивления и величина индуктивности. Следовательно, оказывается влияние на величину тока и напряжения, что не даёт возможности с необходимой достоверностью определить угловое положение ротора;

- в большинстве случаев использование бездатчикового метода определения углового положения сопряжено с применением частотных преобразователей, которые имеют в своём составе IGBT-транзисторы. При работе на низких скоростях, не превышающих 10% от номинальной, на точность определения напряжения и токов оказывает влияние «мертвое время» силовых ключей. Следовательно, определение углового положения ротора с высокой точностью будет затруднено [7].

Известно [8], что управление приводом переменного тока без датчика скорости при нулевой частоте тока статора и отсутствии инжекции сигнала теоретически неустойчиво.

У определенной группы механизмов работа при низких скоростях вращения сопровождается малыми нагрузками. Следовательно, высокого определения точности при определении скорости в диапазоне до 10% от номинальной скорости не требуется. Однако ряд механизмов требует точного определения углового положения во всём диапазоне скоростей.

Целью данной статьи является анализ известных методов бездатчикового определения углового положения, которые обладают высокой точностью в диапазоне низких скоростей

ИЗВЕСТНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Большая сложность при бездатчиковом методе возникает в ходе нахождения начального положения ротора. Для электроприводов с частотным регулированием, работающих в диапазоне скоростей близких к номинальным, с небольшим диапазоном регулирования, эта проблема не особенно актуальна. А вот для устройств плавного пуска, работающих по принципу векторно-импульсного управления, определение положения ротора в диапазоне малых скоростей является первоочередной задачей.

В работе [9] предлагается система импульсно-векторного управления асинхронным двигателем с фазным ротором. За счет прямого измерения напряжения на обмотках статора, кольца ротора и тока силовой цепи определяется величина углового положения ротора. Идея определения углового положения ротора заключается в сравнении угловых зависимостей действующих напряжений на обмотках статора и ротора.

На асинхронном двигателе с фазным ротором возможно образование шести зависимостей напряжений на обмотках от угла поворота ротора (рис. 1).

В начальный момент времени напряжение питания подается на статорные обмотки AX и BY, обмотка CZ обесточена. Ток в цепи пройдет следующий путь: фаза A питающей сети – обмотка статора AX – тиристор VD4 – обмотки ротора ax– by–тиристор VD3 – обмотка YB – фаза B.

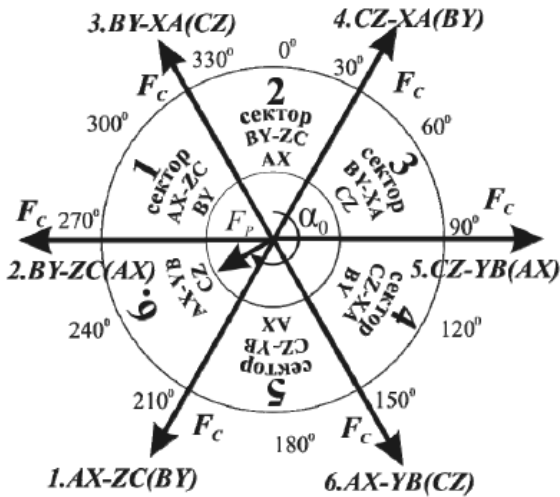


Рис.1. Функциональная диаграмма задачи косвенного определения α_0

Обозначение взаимных индуктивностей выполнено с помощью двойного индекса. Например, взаимная индуктивность обмотки статора AX и эквивалентной обмотки ротора P обозначается L_{AXP} . С учетом принятых обозначений схема замещения цепи AB будет иметь вид, показанный на рис. 2.

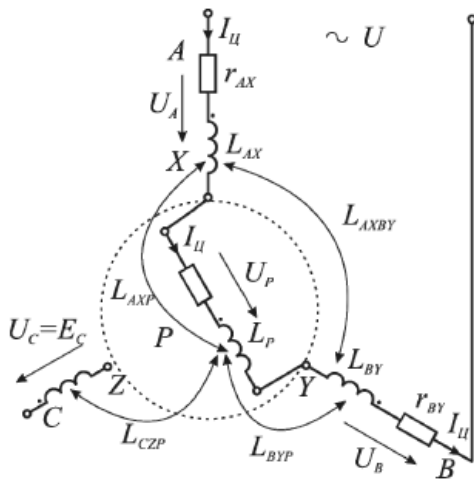


Рис. 2. Схема замещения цепи AB

Система уравнений, описывающая представленную на рис. 2 схему замещения, имеет вид (2):

$$\frac{di_{Ц}}{dt} = \frac{u_A - u_B - 2 \cdot i_{Ц} \cdot (r_1 + r_2)}{L_{\Sigma}}$$

$$u_{AX} = r_1 \cdot i_{Ц} + L_{1\sigma} \cdot \frac{di_{Ц}}{dt} + L_{AXBY} + L_M \cdot \left[1 + \sqrt{3} \cdot \frac{E_{20}}{U_{1H}} \cdot \cos(\alpha) \right] \cdot \frac{di_{Ц}}{dt}$$

$$u_{BY} = r_1 \cdot i_{Ц} + L_{1\sigma} \cdot \frac{di_{Ц}}{dt} + L_{AXBY} + L_M \cdot \left[1 + \sqrt{3} \cdot \frac{E_{20}}{U_{1H}} \cdot \cos(\alpha + 60^\circ) \right] \cdot \frac{di_{Ц}}{dt}$$

$$u_{CZ} = \sqrt{3} \cdot \frac{E_{20}}{U_{1H}} \cdot L_M \cdot \cos(\alpha - 60^\circ) \cdot \frac{di_{Ц}}{dt}$$

$$u_{ab} = \sqrt{3} \cdot r_2 \cdot i_{Ц} + \sqrt{3} \cdot L_{2\sigma} \cdot \frac{di_{Ц}}{dt} + L_M \cdot \left[\sqrt{3} \cdot \frac{E_{20}}{U_{1H}} + \cos \alpha + \cos(\alpha - 60^\circ) \right] \cdot \frac{di_{Ц}}{dt}$$

$$u_{bc} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot r_2 \cdot i_{Ц} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot L_{2\sigma} \cdot \frac{di_{Ц}}{dt} + L_M \cdot \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{E_{20}}{U_{1H}} + \cos \alpha + \cos(\alpha - 60^\circ) \right] \cdot \frac{di_{Ц}}{dt}$$

$$u_{ca} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot r_2 \cdot i_{Ц} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot L_{2\sigma} \cdot \frac{di_{Ц}}{dt} + L_M \cdot \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{E_{20}}{U_{1H}} + \cos(\alpha + 60^\circ) + \cos(\alpha + 120^\circ) \right] \cdot \frac{di_{Ц}}{dt}$$

где $L_{1\sigma}$ – индуктивное сопротивление рассеяния статора; $L_{2\sigma}$ – индуктивное сопротивление рассеяния ротора; L_M – взаимная индуктивность; E_{20} – напряжение на кольцах ротора; U_{1H} – номинальное линейное напряжение на статоре.

Величина падения напряжений на обмотках двигателя состоит из ЭДС самоиндукции и ЭДС взаимной индукции. На рис. 3 представлен график, характеризующий зависимость действующего напряжения от величины угла поворота.

Главный недостаток предлагаемого метода, усложняющий задачу определения углового положения ротора – невозможность использования мгновенных значений, т.к. возникает проблема деления на ноль. Дополнительную сложность методу придаёт изменение нагрузки, что приводит к необходимости учета её влияния. Так же необходимо учесть фазовый сдвиг мгновенных значений тока и напряжения. Для этого необходимо использовать устройство определения фазового сдвига.

В работе [10] предложены два различных метода расчета устойчивости при проектировании адаптивного наблюдателя полного порядка для бездатчиковых асинхронных приводов. При реализации первого метода, основанного на классическом алгоритме оценки скорости, используемого в адаптивном наблюдателе, ошибкой оцениваемого потока пренебрегают. Предложен метод робастно расчета коэффициентов обратной связи с помощью классического алгоритма оценки скорости. По сравнению с

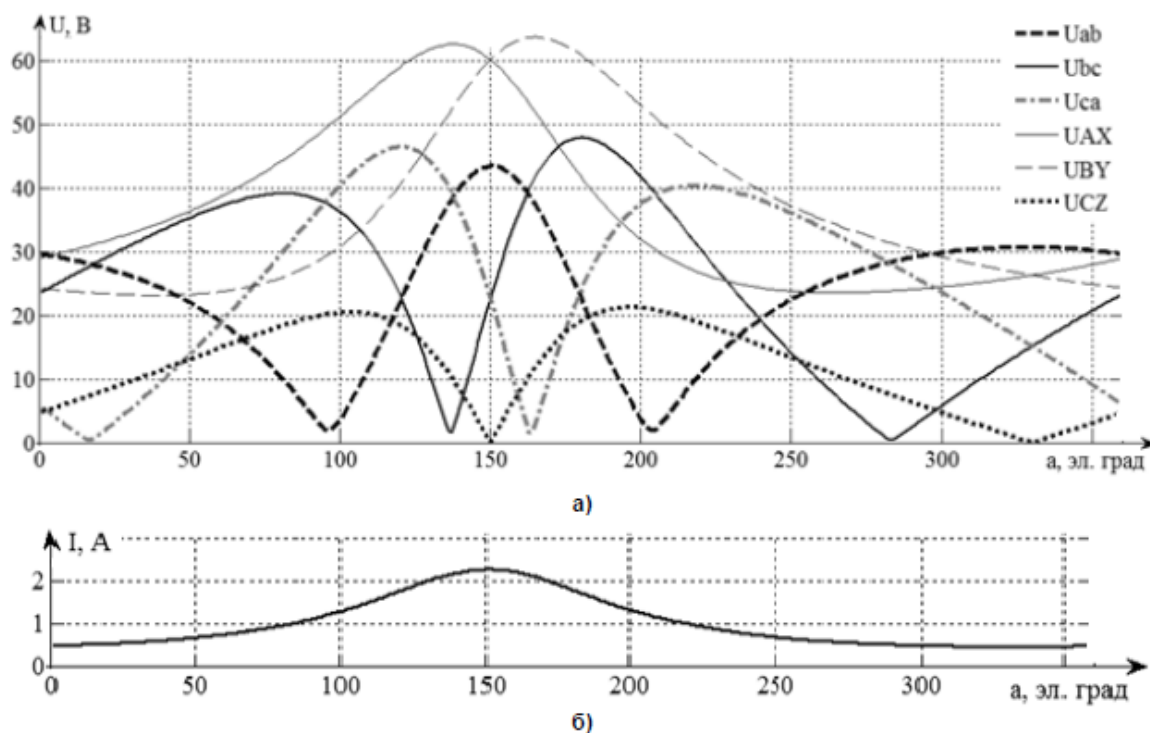


Рис. 3. Действующие значение при изменении α от 0 до 360 град:
 a – напряжение на обмотках статора и кольцах ротора; b – тока цепи

существующими основными методами расчета коэффициентов обратной связи достоверность оценки скорости и оцениваемой ошибки скорости улучшены. При реализации второго метода используют алгоритм робастной оценки скорости с учетом ошибки оцениваемого потока ротора и соответствующих коэффициентов обратной связи. На основе теоремы Ляпунова подтверждается устойчивость предложенного алгоритма оценки скорости. Реализуемость двух предложенных методов подтверждается экспериментально.

В работе [11] предложен улучшенный метод оценки потока ротора для бездатчикового асинхронного электропривода с адаптивным управлением крутящим моментом, позволяющий улучшить его характеристику при низких и нулевых скоростях вращения. Обычная схема управления крутящим моментом с эталонной моделью использует оценщик потока с прогнозом и фильтром нижних частот. Однако характеристика этого метода имеет ряд недостатков, в частности, при очень низких скоростях вращения погрешности в оценке потока значительно влияют на работу бездатчиковой схемы. Характеристики предложенной схемы проверены моделированием и тестированием электропривода на 7,5 кВт с косвенным управлением. Полученные результаты подтвердили эффективность предложенного оценщика в диапазоне низких и нулевых скоростей вращения при повышенной устойчивости к вариациям параметров двигателя по сравнению с устойчивостью обычных методов оценки.

В работе [12] за счет новой стратегии ослабления поля в сочетании с усовершенствованным адаптивным дискретным наблюдателем скорости линейного порядка достигается улучшение характеристик бездатчиковых асинхронных электроприводов. Надежный регулятор ослабления

поля управляет током возбуждения и уровнем ограничения крутящего момента, который соответствует рабочему режиму машины. По сравнению с традиционным методом регулирования скорости предложенный регулятор обеспечивает выбор более высокого максимального крутящего момента и более высокую робастность привода. Для оценки скорости вращения ротора разработан дискретный адаптивный наблюдатель скорости линейного порядка. Когда машина работает на высокой скорости вращения, два полюса передаточной функции наблюдателя с обычно прямой аппроксимацией Эйлера находятся на комплексной плоскости за пределами единичной окружности, что приводит к неустойчивости системы. Для решения конфликта между устойчивостью, точностью и затратами вычислительных ресурсов для дискретизации наблюдателя используют улучшенную аппроксимацию Эйлера.

В работе [13] предлагается простое регулирование потока для прямого управления крутящим моментом асинхронного двигателя с целью улучшения оценок скорости и крутящего момента в диапазонах низкой и нулевой скорости вращения. Для этого трёхуровневый гистерезисный компаратор крутящего момента заменен регулятором с постоянной частотой коммутации. Такой регулятор имеет простую структуру и несложную таблицу переключений. С его помощью поддерживается постоянная частота коммутации и одновременно решается проблема уменьшения потока, которая обычно и возникает в диапазоне низких скоростей вращения. При этом оценки потока статора и крутящего момента при низких скоростях улучшаются. Экспериментально подтверждено, что при улучшенном регулировании потока статора наблюдается значительное повышение точности оценок скорости и крутящего момента при очень низкой нулевой рабочей частоте вращения.

В работе [14] для реализации при нулевой частоте тока статора без инжекции какого-либо сигнала вводится ошибка между входными напряжениями статоров адаптивного линейного наблюдателя и двигателя. Когда частота тока статора уменьшается до нуля, традиционную оценку скорости реализовать невозможно, но скорость вращения ротора можно оценить с помощью предложенной ошибки входного напряжения статора. Недостаток данного метода – наличие ошибки между оцениваемой и реальной скоростью ротора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный в работе [9] метод определения углового положения ротора асинхронного двигателя при низкой скорости обладает достаточно простой структурой. Однако необходимо вводить дополнительное оборудование (устройство фазового сдвига), а также учитывать правильную обработку деления на ноль. Остальные из рассмотренных способов [10-14] предполагают использование дополнительного сигнала, либо сигнала рассогласования, который бы позволял учитывать угловое положение при нулевой и низкой скорости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Басков С.Н. Высокочастотная инжекция сигналов при бездатчиковом методе определения углового положения ротора синхронного двигателя / С.Н. Басков, К.В. Лицин // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2013. – №1. – С. 28-33.
2. Радионов А.А. Исследование влияния на сеть трёхуровневого активного выпрямителя на базе восемнадцатипульсной схемы выпрямления / А.А. Радионов, А.С. Маклаков // *Wissenschaftliche Welt: Сб. научн. трудов Международной научно-технической конференции им. Леонардо да Винчи*. – 2013. – Т. 1. – С. 176-178.
3. Jang J.-H. Sensorless drive of smpm motor by high frequency signal injection. – 2002. – 7 p.
4. Visinka R. Системы управления электродвигателям на микроконтроллерах фирмы Motorola / R. Visinka, L. Chalupa, I. Skalka // *ChipNews*. – 1999. – №1. – С. 10-16.
5. Persson J. Innovative standstill position detection combined with sensorless control of synchronous motors. – Lausanne, Switzerland: École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), 2005.
6. 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) (Omsk, 21-23 May 2015)*. – Omsk, 2015. – P. 137-141.
7. 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.
8. Исследование положения вектора потокоцепления ротора при векторно-импульсном пуске / С.Н. Басков, А.С. Коньков, Т.В. Черкас, К.В. Лицин // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Энергетика*. – 2012. – №37. – С. 68-72.
9. Усынин Ю.С. Асинхронный электропривод с импульсно-векторным управлением / Ю.С. Усынин, А.В. Валов, Т.А. Козина // *Электротехника*. – 2011. – №3. – С. 15-19.
10. Design Method of Adaptive Full Order Observer With or Without Estimated Flux Error in Speed Estimation Algorithm / W. Sun, Y. Yu, G. Wang, B. Li // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2016. – vol. 31, is. 3. – P. 2609-2626. DOI: 10.1109/TPEL.2015.2440373.
11. Smith A.N. Improved Rotor Flux Estimation at Low Speeds for Torque MRAS-Based Sensorless Induction Motor Drives / A.N. Smith, S.M. Gadoue, J.W. Finch // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. – 2016. – vol. 31, is. 1. – P. 270-282. DOI: 10.1109/TEC.2015.2480961.
12. Speed-Sensorless Induction Machine Control in the Field-Weakening Region Using Discrete Speed-Adaptive Full-Order Observer / B. Wang, Y. Zhao, Y. Yu, G. Wang // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2016. – vol. 31, is. 8 – P. 5759-5773. DOI: 10.1109/TPEL.2015.2496350.
13. Alsofyani I.M. Simple Flux Regulation for Improving State Estimation at Very Low and Zero Speed of a Speed Sensorless Direct Torque Control of an Induction Motor / I.M. Alsofyani, N.R. Idris // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2016. – vol. 31, is. 4. – P. 3027-3035. DOI: 10.1109/TPEL.2015.2447731.
14. Zero Stator Current Frequency Operation of Speed-Sensorless Induction Motor Drives Using Stator Input Voltage Error for Speed Estimation / W. Sun, X. Liu, J. Gao et. al. // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2016. – vol. 63, is. 3. – P. 1490-1498. DOI: 10.1109/TIE.2015.2493143.

Overview of Known Methods for Determining the Angular Position of the Rotor of an Induction Motor

Litsin K.V., Simidotsky A.E.

National Research Technological University MISIS, Novotroitsk branch
Novotroitsk, Russian Federation

k.litsin@rambler.ru, simidockii.1996@mail.ru

Abstract. The influence of a mechanical sensor on the operation of an electric drive is analyzed. The technology of sensorless determination of the angular position of the rotor of an asynchronous motor is considered. Advantages and disadvantages of

using such systems in place of systems using the rotor position sensor are presented. Among the advantages of using sensorless systems, the following is noted: low cost, compactness and reliability. Analyzed methods of sensorless determination of the angu-

lar position of the rotor made it possible to identify shortcomings, which are related to the difficulty in determining the angular position of the rotor at zero and low frequencies. The way of the decision of the given problem is in detail considered.

Keywords: induction motor, sensorless system, injection, low frequency, reliability.

REFERENCES

1. Litsin K.V., Baskov S.N. The high-frequency signal injection at sensorless method for determining the angular position of the rotor of a synchronous motor [Vysokochastotnaya inzhetsiya signalov pri bezdatchikovom metode opredeleniya uglovogo polozheniya rotora sinkhronnogo dvigatelya], *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal [Russian Internet Journal of Industrial Engineering]*, 2013, no.1, pp. 28-33. (in Russ.)
2. Radionov A.A., Maklakov A.S. Investigation of the influence on the three-level network active rectifier based 18-pulsed scheme straightening [Issledovaniye vliyaniya na setrekh-urovnevoogo aktivnogo vypryamatelya na bazevosemnaadtsa-tipulsnoy skhemy vypryamleniya], *Wissenschaftliche Welt*, 2013, vol.1., pp. 176-178. (in Russ.)
3. Jang J.-H. *Sensorless drive of smpm motor by high frequency signal injection*, 2002, 7 p.
4. Visinka R., Chalupa L., Skalka I. Control system of motors on microcontrollers of Motorola [Sistemy upravleniya elektrodivigatelyami na microcontrollerakh firmy Motorola], *ChipNews*, 1999, no.1. (in Russ.)
5. Persson J. *Innovative standstill position detection combined with sensorless control of synchronous motors*, Lausanne, Switzerland, École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), 2005.
6. 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 [Opredelenie uglovogo polozheniya rotora sinkhronnogo dvigatelya putem soedineniya vysokochastotnogo signala v obmotke vozvuzhdeniya], *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON 2015)*, Omsk, 2015, pp. 137-141.
7. Kuksin A.V., Romanov A.V. A mathematical model of adaptive sensorless vector control system of induction motor

[Matematicheskaya model' adaptivno-vektornoy sistemy upravleniya bezdatchikovogo asinkhronnogo elektroprivoda], *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Voronezh State Technical University]*, 2009, vol. 5, no.11, pp. 85-87. (in Russ.)

8. Baskov S.N., Konkov A.S., Cherkas T.V., Litsin K.V. Investigation of the position of the rotor flux-linking vector during a vector-pulse start [Issledovanie polozheniya vektora potokoscepleniya rotora pri vektorno-impul'snom puske], *Vestnik Juzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Energetika" [Bulletin of the South Ural State University. Series "Energy"]*, 2012, no.37, pp. 68-72. (in Russ.)

9. Usynin Yu.S., Valov A.V., Kozina T.A. Asynchronous electric drive with pulse-vector control [Asinkhronnyy elektroprivod s impul'sno-vektornym upravleniem], *Elektrotehnika [Electrical Engineering]*, 2011, no.3. pp. 15-19. (in Russ.)

10. Sun W., Yu Y., Wang G., Li B. Design Method of Adaptive Full Order Observer With or Without Estimated Flux Error in Speed Estimation Algorithm, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, vol.31, is.3, pp. 2609-2626. DOI: 10.1109/TPEL.2015.2440373.

11. Smith A.N., Gadoue S.M., Finch J.W. Improved Rotor Flux Estimation at Low Speeds for Torque MRAS-Based Sensorless Induction Motor Drives, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2016, vol.31, is.1, pp. 270-282. DOI: 10.1109/TEC.2015.2480961.

12. Wang B., Zhao Y., Yu Y., Wang G. Speed-Sensorless Induction Machine Control in the Field-Weakening Region Using Discrete Speed-Adaptive Full-Order Observer, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, vol.31, is.8, pp. 5759-5773. DOI: 10.1109/TPEL.2015.2496350.

13. Alsofyani I.M., Idris N.R. Simple Flux Regulation for Improving State Estimation at Very Low and Zero Speed of a Speed Sensorless Direct Torque Control of an Induction Motor, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, vol.31, is.4, pp. 3027-3035. DOI: 10.1109/TPEL.2015.2447731.

14. Sun W., Liu X., Gao J. et. al. Zero Stator Current Frequency Operation of Speed-Sensorless Induction Motor Drives Using Stator Input Voltage Error for Speed Estimation, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, vol.63, is.3, pp. 1490-1498. DOI: 10.1109/TIE.2015.2493143.

Библиографическое описание статьи

Лицин К.В. Сравнительный анализ известных способов бездатчикового определения углового положения ротора асинхронного двигателя / К.В. Лицин, А.Е. Симидотский // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2017. – Т.4, №1. – С. 10-14.

Reference to article

Litsin K.V., Simidotsky A.E. Overview of known methods for determining the angular position of the rotor of an induction motor, *Russian Internet Journal of Electrical Engineering*, 2017, vol.4, no.1, pp. 10-14.