

УДК62-835:621.313.3

**ВЫСОКОДИНАМИЧНЫЙ НАБЛЮДАТЕЛЬ МАГНИТНОГО
СОСТОЯНИЯ НА ОСНОВЕ ВЕНТИЛЬНОГО ИНДУКТОРНОГО
ДВИГАТЕЛЯ****А. А. Кромм¹, Г.М. Симаков², С.С. Жук²**¹*Linde Material Handling GmbH, Ашаффенбург, Германия*²*Новосибирский государственный технический университет*

Статья посвящена проблеме разработки высокودинамичного наблюдателя потока трехфазного вентильного индукторного двигателя, или коротко индукторного двигателя. Синтез наблюдателя потока базируется на анализе мгновенных мощностей статора двигателя в системах векторного управления индукторных двигателей. В алгоритме наблюдателя отсутствуют интегральные, дифференциальные и итерационные методы математики. Предложенный алгоритм наблюдателя реализован в векторно-матричной форме для современных систем управления электрических приводов. Наблюдатель обеспечивает стабильность и высокую прецизионность в приводах с прямым управлением момента, в которых вариации угла пространственного вектора напряжения инвертора значительно выше, чем в приводах с широтно-импульсной модуляцией. Предложенный алгоритм наблюдателя не требует «эксклюзивных» ресурсов микропроцессорных блоков управления. В работе приведен алгоритм инвариантного по времени наблюдателя, обеспечивающего высокую точность наблюдаемого потока при малых индуктивностях и низких напряжениях индукторного двигателя. Проведен анализ кривых измеренного и наблюдаемого момента индукторного двигателя во время разгона привода.

Ключевые слова: наблюдатель потока двигателя, прямое управление моментом, баланс мощностей, пространство состояний, отсутствие итерационных методов, высокая точность наблюдателя, кривые наблюдаемого момента.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-1-2-37-44

Введение

Перспективы внедрения индукторных двигателей в глубокорегулируемых электроприводах, по мнению многих специалистов, практически неограниченны. Импульс такому оптимизму дает ряд уникальных свойств индукторного двигателя, как например, высокая перегрузочная способность, простота конструкции магнитопроводов ротора, высокие динамические свойства привода за счет малой инерционности безобмоточного ротора [1, 2]. Прецизионная точность воспроизведения заданного момента двигателя в широком диапазоне температур и механических воздействий в сочетании с низкой ценой делает его незаменимым, например, в приводах электрических погрузчиков, где профили динамики привода характеризуются высокими градиентами момента двигателя.

В подтверждение к сказанному один небольшой пример: три европейские фирмы, производящие погрузчики премиум класса в общей сложности более шестидесяти тысяч машин в год, с 2022 года предполагают отказаться от использования асинхронных двигателей из-за высокой стоимости «беличьей клетки» ротора [3]. (Высокая цена синхронных двигателей в производстве и недостаточная точность воспроизведения заданного момента двигателя в широком диапазоне температур ограничивают его применение.)

В общем случае, переход к разработке электрического привода с индукторными двигателями (ИД), в статоре которых уложена классическая трехфазная

обмотка, не вызывает больших проблем, за исключением, пожалуй, методов и способов идентификации магнитного состояния электрической машины. Так как электромагнитный поток ИД является функцией тока статора и угла поворота ротора, градиенты его изменения велики, что, в свою очередь, требует применения быстродействующих наблюдателей. Классические наблюдатели, использующие, например, интегральные оценки разницы подводимого напряжения статора и падения напряжения на сопротивлении статорной цепи, недостаточно динамичны. В технической литературе можно найти материалы по анализу и синтезу динамических наблюдателей потока двигателя, которые преимущественно базируются на итерационных методах математики, в предположении об обеспечении желаемой точности метода за конечное время вычисления микропроцессорных устройств [4, 5]. При превышении отведенного для идентификации времени, которое, в первую очередь, определяется мощностью процессора, прецизионность наблюдаемого потока становится недостаточной. Для повышения точности оценки потока, например, в [6] предлагается адаптивный метод, основанный на многомодельном расширенном фильтре Калмана с иерархическим переходом от модели к модели. Повышенная точность результата получается путем «смешивания» выходных данных разных моделей с разными весовыми коэффициентами.

Не углубляясь в детальное описание достоинств и недостатков вышеуказанных наблюдателей, следует отметить два основных недостатка, ограничивающих их применение в массовом производстве: сложность алгоритма и соответственно программного обеспечения микропроцессорных устройств, а также трудоемкость оптимизации времени итерационного процесса или весовых коэффициентов. Устранить указанные недостатки позволяет методика оценки потока, которая будет приведена ниже.

1. Постановка задачи

Целью работы является синтез высокودинамичного наблюдателя магнитного состояния индукторного двигателя (НМСД) на базе анализа мощностей двигателя. В алгоритме для повышения динамической точности наблюдателя используются исключительно алгебраические уравнения. Простота и «прозрачность» данного метода ставят целью сократить время разработки, анализа и синтеза высокودинамичных приводов с индукторными двигателями.

Постановка задачи определяет основные требования к разработке привода и наблюдателя:

- математическое описание контуров статорной обмотки двигателя общепринятое, как в неподвижных, так и во вращающихся координатах;
- алгоритм оценки потока должен учитывать отсутствие потерь в роторе ИД (достоинство ИД, которое обеспечивает успех этого типа двигателя на рынке);
- приоритетным алгоритмом управления двигателем является прямое управление моментом (англ.: Direct Torque Control (DTC)), так как указанный способ обеспечивает максимальную динамику привода [7];
- алгоритм наблюдателя не должен содержать интегралы и производные сигналов. Первые ухудшают динамические свойства, особенно при малых частотах вращения двигателя [8], вторые нарушают прецизионность наблюдателя вследствие ограниченной помехозащищенности электрической части привода [9];
- алгоритм наблюдателя должен реализовываться в векторно-матричной форме для успешной интеграции НМСД в системы векторного управления двигателя;
- синтез НМСД должен осуществляться в оптимизированных по стоимости микропроцессорных устройствах, не обладающих «сверхресурсами».

2. Синтез наблюдателя

Разработка алгоритма идентификации магнитного состояния машины базируется на анализе баланса мгновенных мощностей двигателя, основой которого, в свою очередь, является закон сохранения энергии. Запасенную энергию в фазе двигателя целесообразно оценить через классическое уравнение равновесия напряжений статорной цепи ИД во вращающейся синхронно с ротором (индекс «г») системе координат [8]:

$$U_s^r = I_s^r R_s + L_s \frac{dI_s^r}{dt} + j\omega_r \psi_s^r, \quad \text{причем} \quad \omega_r = \frac{d\phi_r}{dt}, \quad (1)$$

где I_s, L_s, ψ_s, U_s – ток, индуктивность, поток и напряжение статора двигателя; R_s – омическое сопротивление статорной обмотки двигателя; ω_r, ϕ_r – угловая скорость и угол поворота ротора двигателя.

Умножив каждый член уравнения (1) на $I_s^r \Delta t$ и опустив, для простоты чтения индекс «г», получим следующее уравнение для энергий:

$$U_s I_s \Delta t = I_s^2 R_s \Delta t + \psi_s \Delta I_s + j I_s \psi_s \Delta \phi, \quad (2)$$

где Δt – некоторый конечный интервал времени.

Записав (2) в обобщенном виде, получим

$$E_s = \Delta E_s(I_s, R_s) + E_m(I_s, \psi_s) + E_{em}(I_s, \psi_s, \Delta \phi), \quad (3)$$

где E_s – полная энергия, подводимая к двигателю; ΔE_s – потери энергии на активном сопротивлении статора двигателя; E_m – магнитная энергия двигателя согласно определению энергии: $W_0 = \int_0^\psi i d\psi$ [10]; E_{em} – энергия электрохимического преобразователя, затраченная на формирование вращающего момента двигателя, согласно определению коэнергии: $W_0^* = \int_0^i \psi di$ [10].

Баланс энергий (3) позволяет определить полную, активную и реактивную мощности в двигателе, с учетом допущения отсутствия потерь в роторе ИД. (Замечание: данное допущение для ИД с полнотельным шихтованным ротором не является грубым в сравнении, например, с асинхронным двигателем, в роторе которого реализована «беличья клетка»).

Реактивную мощность (Q) легко выделить из магнитной энергии E_m :

$$Q = I_s L_s \frac{dI_s}{dt} = I_s \frac{d\psi_s}{dt} = I_s \omega \frac{d\psi_s}{d\phi} = \mathbf{I}_s^T \omega \mathbf{D} \psi_s = \mathbf{I}_s^T \mathbf{D} \mathbf{U}_s, \quad (4)$$

причем $\mathbf{I}_s, \psi_s, \mathbf{U}_s$ – вектор тока, потока и напряжения двигателя; $\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ – классическая матрица преобразования, позволяющая перейти к инвариантной по времени системе, записанной в векторно-матричной форме, а также позволяющая

записать реактивную мощность через векторное произведение векторов тока напряжения статора.

С учетом скалярной и векторно-матричной формы записи активной мощности фазы двигателя можно представить в следующем виде:

$$P = R_s I_s^2 + I_s \omega \psi_s = I_s (R_s I_s + \omega \psi_s) = \hat{\mathbf{I}}_s^T \mathbf{U}_s. \quad (5)$$

Компоненты наблюдаемого вектора магнитного потока двигателя $\hat{\Psi}_s$ в скалярной форме определяются из (4, 5) по нижеприведенному выражению:

$$\begin{bmatrix} \hat{\Psi}_{sd} \\ \hat{\Psi}_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Im}(\psi_s) \\ \text{Re}(\psi_s) \end{bmatrix} = (I_s \omega_e)^{-1} \begin{bmatrix} Q \\ P - R_s I_s^2 \end{bmatrix}$$

или в векторно-матричной форме:

$$\begin{bmatrix} \hat{\Psi}_{sd} \\ \hat{\Psi}_{sq} \end{bmatrix} = [(\mathbf{I}_s^T \mathbf{I}_s)^{\frac{1}{2}} \omega_e]^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_s^T \mathbf{D} \mathbf{U}_s \\ \mathbf{I}_s^T \mathbf{U}_s - \mathbf{I}_s^T \mathbf{R} \mathbf{I}_s \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где d, q – индекс продольной и поперечной осей вращающейся системы координат; ω_e – угловая скорость вращающейся системы координат; $\mathbf{R} = \text{diag}(r_d(t^\circ), r_q(t^\circ))$ – матрица сопротивлений обмотки статора во вращающейся системе координат с учетом влияния температурного фактора на омическое сопротивление.

Реализация алгоритма (6) не представляет большого труда на практике. Следует, однако, отметить, что в некоторых случаях для повышения точности формирования вектора потока при малых напряжениях статора или малой индуктивности обмотки статора двигателя целесообразней воспользоваться следующим выражением:

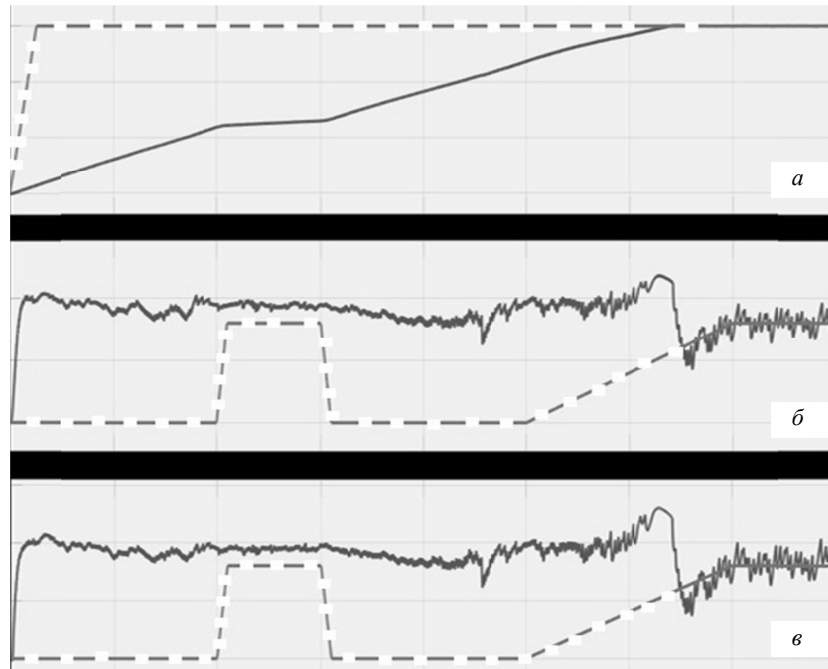
$$\begin{bmatrix} \hat{\Psi}_{sd} \\ \hat{\Psi}_{sq} \end{bmatrix} = \left[\omega_e (\mathbf{I}_s^T \mathbf{I}_s)^{\frac{1}{2}} \right]^{-1} \begin{bmatrix} [(\mathbf{I}_s^T \mathbf{I}_s)(\mathbf{U}_s^T \mathbf{U}_s) - (\mathbf{I}_s^T \mathbf{U}_s)(\mathbf{I}_s^T \mathbf{U}_s)]^{\frac{1}{2}} \\ \mathbf{I}_s^T \mathbf{U}_s - \mathbf{I}_s^T \mathbf{R} \mathbf{I}_s \end{bmatrix},$$

в котором реактивная мощность рассчитывается через полную и активную мощность.

Модуль вектора потока статора двигателя целесообразно записать, и соответственно рассчитывать, в классической форме, а именно:

$$|\hat{\Psi}_s| = \left(\hat{\Psi}_s^T \hat{\Psi}_s \right)^{\frac{1}{2}}.$$

По результатам анализа и синтеза НМСД была проведена разработка программного обеспечения наблюдателя на базе оптимизированного по стоимости 16-битного процессора. Результаты имплементации разработанного наблюдателя в привод с ИД целесообразно оценить с помощью кривых, приведенных на рисунке.



Кривые заданной (пунктирная линия) и измеренной частоты вращения вала ИД (а), нагрузочного (пунктирная линия) и измеренного момента двигателя (б), нагрузочного (пунктирная линия) и наблюдаемого момента двигателя (в)

Curves of the set (dashed line) and measured shaft speed ID (а), load (dashed line) and measured motor torque (б), load (dashed line) and observed motor moment (в)

Замечание: наблюдаемый момент двигателя реализован через оценки потока наблюдателя и измеренного тока статора по следующей зависимости:

$$M = k(\psi_{sd}I_{sq} - \psi_{sq}I_{sd}),$$

где k — константа пропорциональности момента.

Сравнение кривых измеренного (б) и наблюдаемого (в) момента ИД свидетельствует о высокой точности и динамике наблюдателя. Высокочастотная составляющая в измеренном и наблюдаемом моменте двигателя объясняется высокими пульсациями питающего напряжения (тяговая батарея) и необходимостью формирования в приводах с ДТС исключительно фиксированных положений пространственного вектора напряжения преобразователя при варьируемой частоте коммутации его полупроводников. Варьируемая частота коммутации преобразователя является следствием применения релейных регуляторов в контурах потока и момента двигателя. Наблюдатель обеспечивает высокую стабильность и точность привода, несмотря на то что «разброс» угла вектора напряжения инвертора при ДТС значительно выше, чем в преобразователях с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ).

Заключение

1. Идентификация потока статора двигателя осуществляется без применения итерационных, интегральных или дифференциальных методов математики. Точность идентификации НМСД в аспекте сказанного высока, так как не зависит от

времени как параметра. Алгоритм базируется исключительно на алгебраических выражениях, что позволяет быстро осуществить реализацию наблюдателя на практике.

2. Описанный алгоритм учитывает «автоматически» угловую скорость ротора, так как предложенная методика НМСД идентифицирует поток во вращающейся системе координат. Как следствие, НМСД обеспечивает точную оценку потока даже тогда, когда статор запитан, но ротор двигателя неподвижен.

3. Погрешность наблюдателя от неточности оценки омического сопротивления обмотки статора при нагреве ИД существенно ниже, чем в наблюдателях потока асинхронных двигателей, так как в наблюдателях последних требуется информация о температуре обмотки ротора. В оптимизированных по стоимости приводах прямое измерение температуры ротора недоступно. В приводе с индукторным двигателем необходимость измерения температуры ротора отпадает, а температура обмотки статора ИД доступна прямому измерению.

4. Предложенный алгоритм предпочтителен в оптимизированных по стоимости приводах, так как его программное обеспечение не требует «эксклюзивных» ресурсов блоков управления. Так, например, в микропроцессоре семейства XC22xx с тактовой частотой 100 MHz время вычисления предложенного алгоритма составляет не более 2 μ s, в случае реализации функции извлечения квадратного корня в табличной форме.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Александровский С.В., Петренко Ю.Н.** Анализ схем питания вентильно-индукторных двигателей // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2010. – № 6. – С. 27–31.
2. **Бычков М.Г.** Вентильно-индукторный электропривод: современное состояние и перспективы развития // Рынок электротехники. – 2007. – № 2. – С. 48–55.
3. **Reichel J.** [LogiMAT 2018: Jungheinrich automatisiert und elektrifiziert] // Logistra. – 2018. – N 1–2. – P. 12–14.
4. Patent DE 102012223441. Verfahren und System für sensorloses Steuern eines elektrischen Motors / Y.C. Son, L. Dunbar, S. Hiti. – Publ. Date 11.07.2013.
5. Patent DE 102009025390. Verfahren zur Regelung eines umrichter gespeisten Elektromotors und umrichter gespeister Elektromotor / W. Hammel, T. Schuster, H. Wolf, R. Kimmich, A. Kulessa. – Publ. date 14.01.2010.
6. Speed and flux observer of induction motor based on extended Kalman Filter and Markov Chain / Y. Zhonggang, L. Guoyin, Z. Yanqing, L. Jing, S. Xiangdong, Z. Yanru // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2017. – Vol. 32, N 9. – P. 7096–7117. – DOI: 10.1109/TPEL.2016.2623806.
7. **Schroeder D.** Elektrische Antriebe, regelung von antriebssystemen. – Berlin: Springer-Verlag, 2009. – P. 740–758. – DOI: 10.1007/978-3-540-89613.
8. **Соколовский Г.Г.** Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для вузов. – М.: Академия, 2007. – 272 с.
9. **Балковой А.П., Цаценкин В.К.** Прецизионные электроприводы с вентильными двигателями // Электропривод с вентильными двигателями: доклады научно-практического семинара. – М.: Изд. дом МЭИ, 2007. – С. 35–70.
10. **Crastan V.** Elektrische Energieversorgung 1. – Berlin: Springer-Verlag, 2015. – P. 52–54.

HIGHLY DYNAMIC OBSERVER OF THE MAGNETIC STATE ON THE BASIS OF THE VENTILED INDUCTOR MOTOR

Kromm A.A.¹, Simakov G.M.², Zhuk S.S.²

¹Linde Material Handling GmbH, Aschaffenburg, Germany

²Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The article is devoted to the problem of developing highly dynamic flux observers for three-phase inductor motors. The synthesis of the flux observer is based on the analysis of the instantaneous powers of the motor stator by the vector control of drives. The observation algorithm lacks integral, differential and iterative methods of mathematics. The proposed observer algorithm is implemented in a vector-matrix form for its simplest integration into the modern vector control of electric drives. The observer provides stability and high precision in drives with direct torque control, in which the variation in the angle of the spatial voltage vector of the inverter is much higher than in drives with pulse width modulation. The proposed observer algorithm can be used in cost optimized drives, because its implementation does not require “exclusive” resources of microprocessor control units. The paper presents a time invariant observer algorithm that provides high precision of the observed flux at low inductances and low voltages of the inductor motor. The measured and observed moments of the reluctance motor during the acceleration of the drive were analyzed.

Keywords: flux observer of the inductor motor, direct torque control of the drive, identification based on power analysis, identification in a vector-matrix form, elimination of iterative methods of mathematics, high precision of non-rotating motor observation, presentation of the measured and observed moment.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-1-2-37-44

REFERENCES

1. Aleksandrovskii S.V., Petrenko Yu.N. Analiz skhem pitaniya ventil'no-induktornykh dvigatelei [Feeding system analysis of self-controlled inverter-bed inductor motors]. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob"edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*, 2010, no. 6, pp. 27–31.
2. Bychkov M.G. Ventil'no-induktornyi elektroprivod: sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya [Valve-inductor electric drive: current state and development prospects]. *Rynok elektrotekhniki = Market of electrical engineering*, 2007, no. 2, pp. 48–55.
3. Reichel J. [LogiMAT 2018: Jungheinrich automatisiert und elektrifiziert]. *Logistra*, 2018, no. 1–2, pp. 12–14. (In Deutsch).
4. Son Y.C., Dunbar L., Hiti S. *Verfahren und System für sensorloses Steuern eines elektrischen Motors*. Patent DE, no. DE102012223441, 2013.
5. Hammel W., Schuster T., Wolf H., Kimmich R., Kulesa A. *Verfahren zur Regelung eines umrichtergespeisten Elektromotors und umrichtergespeister Elektromotor*. Patent DE, no. DE102009025390, 2010.
6. Zhonggang Y.A., Guoyin L., Yanqing Z., Jing L., Xiangdong S., Yanru Z. Speed and flux observer of induction motor based on extended Kalman Filter and Markov Chain. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, vol. 32, no. 9, pp. 7096–7117. DOI: 10.1109/TPEL.2016.2623806.
7. Schroeder D. *Elektrische Antriebe, regelung von antriebssystemen*. Berlin, Springer-Verlag, 2009, pp. 740–758. DOI: 10.1007/978-3-540-89613.
8. Sokolovskii G.G. *Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem* [Variable frequency AC drives]. Moscow, Akademiya Publ., 2007. 272 p.
9. Balkovoi A.P., Tsatsenkin V.K. Pretsizionnyi elektroprivod s ventil'nymi dvigatelyami [Precision electric drives with brushless motors]. *Elektroprivod s ventil'nymi dvigatelyami: doklady nauchno-prakticheskogo seminara* [Electric drive with valve motors: reports of the Scientific and Practical Seminar]. Moscow, MEI Publ., 2007, pp. 35–70.
10. Crastan V. *Elektrische Energieversorgung 1*. Berlin, Springer-Verlag, 2015, pp. 52–54.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



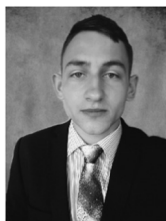
Кромм Андрей Артурович – родился в 1960 году, канд. техн. наук, инженер высшей квалификации в компании Linde Material Handling GmbH, Ашаффенбург, Германия. Является автором более 15 научных публикаций. (Адрес: 630099, Россия, г. Новосибирск, Депутатская 60/39. E-mail: galand@gmx.net).

Kromm Andrej Arturovich (b. 1960) – Candidate of Sciences (Eng.), highly qualified engineer at Linde Material Handling GmbH, Aschaffenburg, Germany. He is the author of more than 15 scientific papers. (Address: 60/39, Deputatskaya Street, Novosibirsk, 630099, Russia. E-mail: galand@gmx.net).



Симаков Геннадий Михайлович – родился в 1942 году, д-р техн. наук, профессор кафедры ЭАПУ. Область научных интересов: автоматизация систем автоматизированного электропривода. Является автором более 150 научных публикаций (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: Simakov44_86@mail.ru).

Simakov Gennady Mikhailovich (b. 1942) – D, Sc. (Eng.), professor in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on automation of automated electric drive systems. He is the author of more than 150 scientific publications (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: Simakov44_86@mail.ru).



Жук Сергей Сергеевич – родился в 1997 году, магистрант кафедры ЭАПУ. Область научных интересов: электропривод переменного тока. Опубликовано одна научная работа. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: sergey.zhuk.97@mail.ru).

Zhuk Sergey Sergeevich (b. 1997) – a master student at the Department of Electric Drives and Automation of Industrial Installations in the Novosibirsk State Technical University. Research interests include AC electric drives. He has published one research paper. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: sergey.zhuk.97@mail.ru).

Статья поступила 20 марта 2020 г.

Received March 20, 2020

To Reference:

Kromm A.A., Simakov G.M., Zhuk S.S. Vysokodinamichnyi nablyudatel' magnitnogo sostoyaniya na osnove ventil'nogo induktornogo dvigatelya [Highly dynamic observer of the magnetic state on the basis of the ventiled inductor motor]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2020, no. 1–2 (46–47), pp. 37–44. DOI: 10.17212/1727-2769-2020-1-2-37-44.