

DOI: 10.15593/2224-9397/2020.1.10

УДК 62.83

**А.Т. Ключников, А.М. Турпак**Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Россия**БЕЗДАТЧИКОВОЕ ВЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ  
АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ПРИ РАСЧЁТЕ  
В КОМПЛЕКСНОЙ ФОРМЕ**

Самым распространённым методом управления асинхронными двигателями является векторное управление с установкой датчиков непосредственно на двигателе. Наличие датчиков в системе управления приводит к повышению риска выхода из строя оборудования. Наиболее эффективным способом улучшения качественных характеристик электропривода, в частности, с векторным управлением, является уход к бездатчиковым методам управления асинхронным двигателем. **Цель исследования:** разработать метод вычисления скорости и положения ротора асинхронного двигателя при бездатчиковом векторном управлении с быстрым программным временем расчёта и с простой реализацией регулирования, используя преимущества комплексных вычислений. **Методы:** в статье рассмотрен вычислитель при бездатчиковом управлении асинхронным двигателем, полученный путём решения системы уравнений Парка–Горева в комплексной форме. Ведение одновременного расчёта для двух проекций переменных при помощи записи в комплексной форме позволяет ускорить скорость вычисления. Проверка результатов выполнялась при помощи компьютерного моделирования. Для этих целей составлена модель асинхронного двигателя в программном комплексе MatLab. **Результаты:** вычислитель, собранный на основе предложенного в данной статье решения, с высокой точностью (0,5 %) определяет значение скорости двигателя, имеет простую и гибкую структуру. Решение возможно масштабировать и применять в других вариантах электропривода ввиду его универсальности. **Практическая значимость:** предложено решение системы уравнений Парка–Горева в комплексной форме. Получена база для создания системы управления асинхронным двигателем с комплексным вычислителем. Применение рассмотренного в статье метода позволяет использовать микропроцессор меньшей производительности и мощности, что значительно снижает стоимость аппаратной части системы управления.

**Ключевые слова:** вычислитель, уравнения Парка–Горева, модель двигателя, бездатчиковое управление, асинхронный двигатель.

**A.T. Klyuchnikov, A.M. Turpak**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

## **SENSORLESS VECTOR CONTROL ASYNCHRONOUS MOTOR WHEN CALCULATING IN A COMPLEX FORM**

The most common method of controlling asynchronous motors is vector control with the installation of sensors directly on the motor. The presence of sensors in the control system increases the risk of equipment failure. The most effective way to improve the quality characteristics of the electric drive, in particular, with vector control, is to approach sensorless methods of controlling an induction motor. **Purpose:** to develop a method for calculating the speed and position of the rotor of an induction motor with a sensorless vector control with fast programmed calculation time and with a simple implementation of regulation, taking advantage of complex calculations. **Methods:** the article considers a computer with sensorless control of an induction motor, obtained by solving the system of Park-Gorev equations in complex form. Conducting a simultaneous calculation for two projections of variables using recording in complex form allows you to speed up the calculation speed. Verification of the results was carried out using computer simulation. For these purposes, an asynchronous motor model was built in the MatLab software. **Results:** a computer assembled on the basis of the solution proposed in this article, with high accuracy (0,5 %) determines the value of the engine speed, has a simple and flexible structure. The solution can be scaled and applied in other versions of the electric drive due to its versatility. **Practical relevance:** a solution of the Park-Gorev system of equations in a complex form is proposed. A base has been obtained for creating an asynchronous motor control system with an integrated computer. The application of the method considered in the article allows the use of a microprocessor of lower performance and power, which significantly reduces the cost of the hardware of the control system.

**Keywords:** observer, Park-Gorev equations, motor model, sensorless control, asynchronous motor.

Результаты и эффективность любого предприятия зависят от механизмов, приводящих его в движение. Механизмы приводят в движение за счёт электромеханических преобразователей энергии, основную долю от которых занимают асинхронные (АД) и синхронные (СД) двигатели [1]. Несмотря на серьезное ускорение в развитии синхронных машин с возбуждением от постоянных магнитов, асинхронные двигатели всё ещё занимают основную часть в фонде двигателей промышленности. Простота конструкции и надёжность АД являются их главными достоинствами.

Тем не менее управление асинхронными двигателями, особенно с короткозамкнутым ротором, представляет серьезную проблему. Самыми простыми в реализации являются законы частотного управления ( $U/f = \text{const}$ , законы управления Костенко и т.п.) [2]. Впоследствии эти законы управления получили название скалярных методов управления. Для реализации более прямого управления токами двигателя, регулирования момента и скорости на валу применяются методы векторного управления.

Впервые принципы векторного управления изложены в работах Блашке [3]. Он описывает управление асинхронным двигателем с координатным преобразователем напряжения и датчиком скорости на валу двигателя. Схема имеет классическую на сегодняшний день структуру. В силовой части напряжение подается на АД через управляемый инвертор со звеном постоянного тока. В цепи управления происходит сравнение заданного значения скорости с текущим, получаемым с датчика скорости на валу двигателя, с последующим вычислением требуемых сигналов для задания амплитуды напряжения, а также угла открытия силовых ключей. Для расчётов также используются значения потокосцеплений, полученных датчиками Холла, которые устанавливаются на статоре двигателя.

Стоит отметить, что схема замещения двигателя, используемая при расчёте параметров [3], основана на системе уравнений Парка–Горева в виде, когда для проекций на каждую ось используется отдельное уравнение. Всего аналоговым методом решаются три дифференциальных уравнения – одно для падений напряжений и два для потокосцеплений.

На сегодняшний день типовой метод векторного управления асинхронным двигателем следующий: в силовой цепи напряжение подаётся на асинхронный двигатель через управляемый инвертор. С двигателя при помощи датчиков получаются значения токов трёх фаз с помощью датчика скорости. Далее выполняются координатные преобразования тока, значения которого совместно с углом поворота ротора позволяют вычислить потокосцепление и угловую скорость. После чего выполняются отдельные вычисления токов  $I_{sd}$ ,  $I_{sq}$  и напряжений  $U_{sd}$ ,  $U_{sq}$ . Значения требуемых напряжений преобразовываются из  $d$ - $q$  в  $\alpha\beta$ -координаты, и формируются управляющие импульсы для управляемого инвертора [4, 5]. В отличие от метода Блашке выполняется расчёт потокосцепления, а датчики магнитного потока более не применяются.

В основном данные методы можно поделить на неадаптивные, адаптивные, с применением нейронных сетей и с применением нечёткой логики [7, 8].

Неадаптивные методы управления асинхронными двигателями имеют сильно выраженную зависимость к значениям параметров двигателя и их изменениям. Так, изменение сопротивления ротора АД на 1 % вызовет значительные погрешности в определении потока и ско-

рости [6, 9]. Соответственно, неадаптивные методы управления находят своё место только в механизмах с невысокими требованиями к точности определения скорости вращения ротора на небольших скоростях, к достижению точных значений момента на валу.

Адаптивные методы, в свою очередь, позволяют как точно определять скорость вращения ротора даже на низких оборотах, так и задавать необходимые точные значения момента, усложняя модель и приводя к необходимости задавать дополнительные параметры при настройке системы [10]. Определение данных параметров требует дополнительного детального моделирования и расчётов.

Из вышеизложенного следует, что на сегодняшний день существует множество методов управления, позволяющих достичь высоких показателей качества регулирования, в то же время отличающихся сложностью реализации и вычислений [11]. Тем не менее необходимость в методах с быстрым программным временем расчёта и с простой реализацией регулирования по-прежнему является актуальной темой [1, 12].

Наблюдатель – динамическая система, которая восстанавливает вектор состояния заданной системы на основе измерения входного и выходного воздействий при известной структуре и параметрах заданной системы. Наблюдатель применяется для формирования, в конечном счёте, ШИМ-сигналов управления инвертором. В свою очередь, одной из составных частей наблюдателя является вычислитель – модуль расчёта угловой скорости двигателя, а также требуемых параметров на основе входных данных [13, 14].

Также работой над векторным управлением в асинхронном электроприводе, наблюдателями состояния и вычислителями работал Ю.Н. Калачев [14]. Он рассматривал структуру неадаптивного наблюдателя потока в замкнутых системах асинхронного и синхронного электропривода на основании трёх электромагнитных уравнений, в которых не выполнялся непосредственно расчёт значения скорости через уравнение движения Ньютона.

Поскольку при малых скоростях затруднены определение противо-ЭДС и расчёт необходимых величин для работы наблюдателей, был разработан метод управления асинхронным двигателем в широком скоростном диапазоне [15, 16] (в том числе и на малых скоростях), а также при ослаблении магнитного потока. В работе показан

метод вычисления оптимального скольжения для тягового асинхронного электродвигателя с использованием датчика скорости, установленного на валу.

Таким образом, основываясь на главном конструктивном отличии методов управления – наличии датчика скорости или положения ротора на валу, методы разделяют на управление с датчиком и бездатчиковое. Повышение требований к электроприводу, невозможность работы датчиков при высокой температуре окружающей среды (не более 125 °С), увеличение габаритов механизма – вот основные причины стремления перейти на бездатчиковые системы управления.

В литературе описано множество различных вариантов бездатчикового управления. Простые методы управления не имеют высокую точность работы и широкий диапазон рабочей скорости. Другие же – имеют высокую сложность и требуют больших вычислительных мощностей на реализацию. Однако для работы всех вышеперечисленных систем необходимо наличие в структуре наблюдателя или вычислителя.

В данной статье рассматривается синтез простого вычислителя для последующей разработки бездатчикового управления асинхронным двигателем. Большинство разработчиков используют систему уравнений Парка–Горева в виде, где каждой координатной оси соответствует своё уравнение из системы уравнений. Однако в данной статье рассмотрено использование описания уравнений асинхронной машины в комплексной форме. Такой подход уменьшает количество решаемых уравнений и ускоряет выполнение расчётов.

**Математическое описание асинхронного двигателя.** Структурная модель системы управления для асинхронного двигателя представлена на рис. 1.

Практически во всех системах управления присутствуют типовые элементы – инвертор, ШИМ, преобразователь  $ab/alf\_bett/d/q$ , регулятор тока для управления ШИМ посредством перехода в координаты  $alf\_bett$  [17].

Блок задания формирует требуемые значения токов  $i_d, i_q$ , после чего определяется необходимое значение напряжения  $U_d, U_q$ . После координатного преобразования формируется управляющий сигнал на инвертор. Вычислитель скорости, в свою очередь, обрабатывает значения токов и напряжений модели и рассчитывает значения угловой скорости и угла  $\theta$ .

Отдельно вычисление скорости у Блашке [3] не выполняется, так как для этих целей используется датчик скорости.

В синхронных машинах скорость вращения находят через датчик положения ротора, или регистрацией перехода ЭДС через ноль. В асинхронных машинах вычислитель скорости в явном виде не представлен.

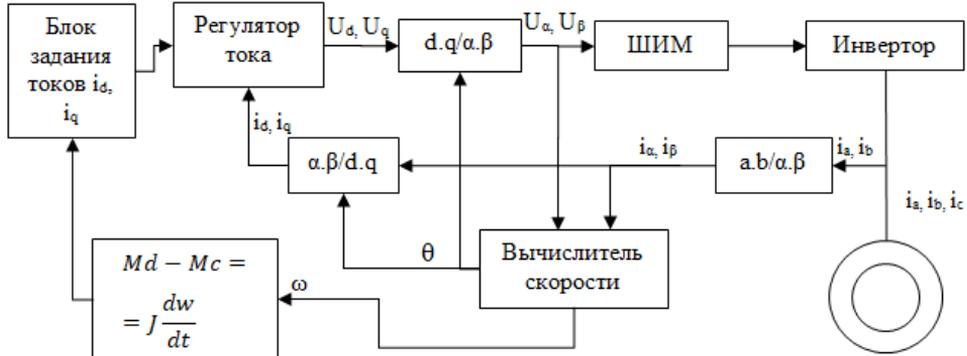


Рис. 1. Структурная схема бездатчикового управления АД

Для исследования асинхронной машины в данной статье применяется имитационное моделирование – метод замены реального объекта достаточно точным его описанием с рядом допущений. Целью имитационного моделирования в первую очередь является упрощение выполнения экспериментов и получения данных исследований [18].

Математическое описание асинхронной машины основано на классическом виде уравнений Парка–Горева в комплексном виде (1) [19].

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\bar{\Psi}}{dt} = \bar{U}_S - \bar{I}_S R_S, \\ \bar{\Psi}_S = \bar{I}_S X_S + \bar{I}_r X_m, \\ \bar{\Psi}_r = \bar{I}_S X_m + \bar{I}_r X_r, \\ \frac{d\bar{\Psi}_r}{dt} = 0 - \bar{I}_r R_r + j\bar{\Psi}_r \omega, \\ M = I_d \bar{\Psi}_q - I_q \bar{\Psi}_d, \\ M_{дв} - M_C = J \frac{dw}{dt}. \end{array} \right. \quad (1)$$

Как видно, первые три уравнения использованы как у Блашке, так и в работах Калачёва и других. Основываясь на системе уравнений (1), была построена модель асинхронного двигателя в MatLab/Simulink (рис. 2) [20].

Входные параметры двигателя, соответствующие Т-образной схеме замещения и управления, записаны в относительных единицах и представлены на рис. 3.

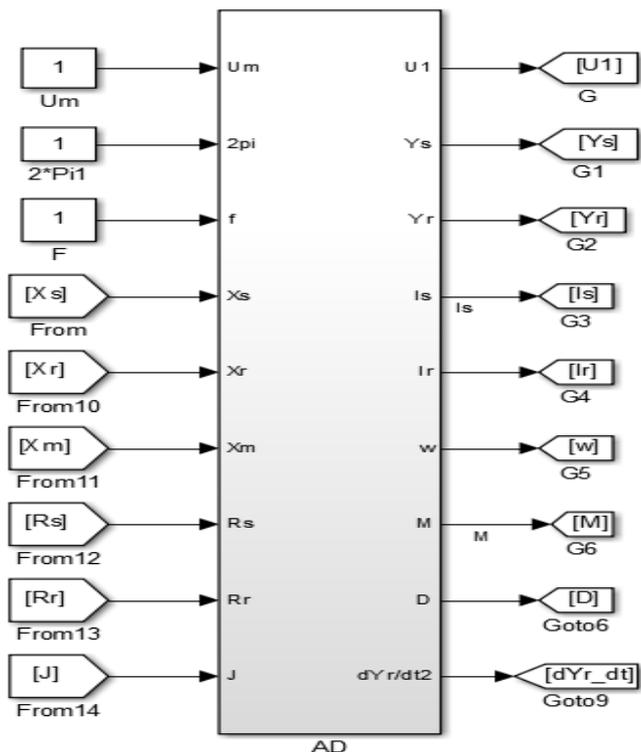


Рис. 2. Модель АД в комплексной форме

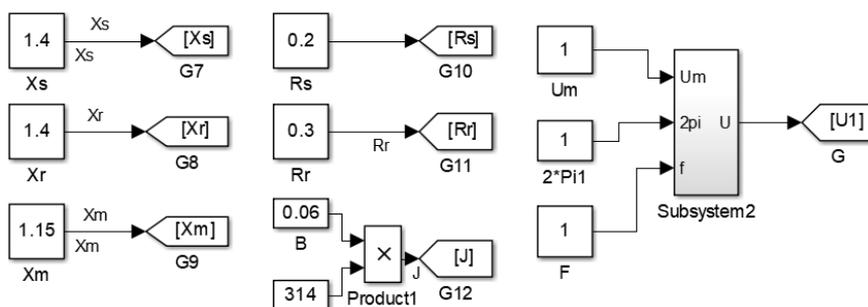


Рис. 3. Задание входных параметров модели

Работоспособность представленной модели была подтверждена опытом пуска на холостом ходу. На рис. 4 показаны изменения потокоцеплений, токов статора и ротора, момента и угловой скорости. При

пуске наблюдается характерное многократное потребление тока статора. В момент пуска по обмоткам ротора протекает значительный ток, который при приближении к номинальной частоте вращения значительно снижается и практически равен нулю. Также механические характеристики машины – пульсации момента на валу с последующим спадом до значения момента сопротивления и увеличение скорости до номинального значения – подтверждают адекватность модели.

На рис. 5 представлен опыт с набросом нагрузки. В момент времени  $t = 50$  мс на вал двигателя была добавлена нагрузка, равная  $0,5\omega$ . На графике наблюдается снижение скорости вращения пропорционально нагрузке на валу, что соответствует реальной модели асинхронного двигателя.

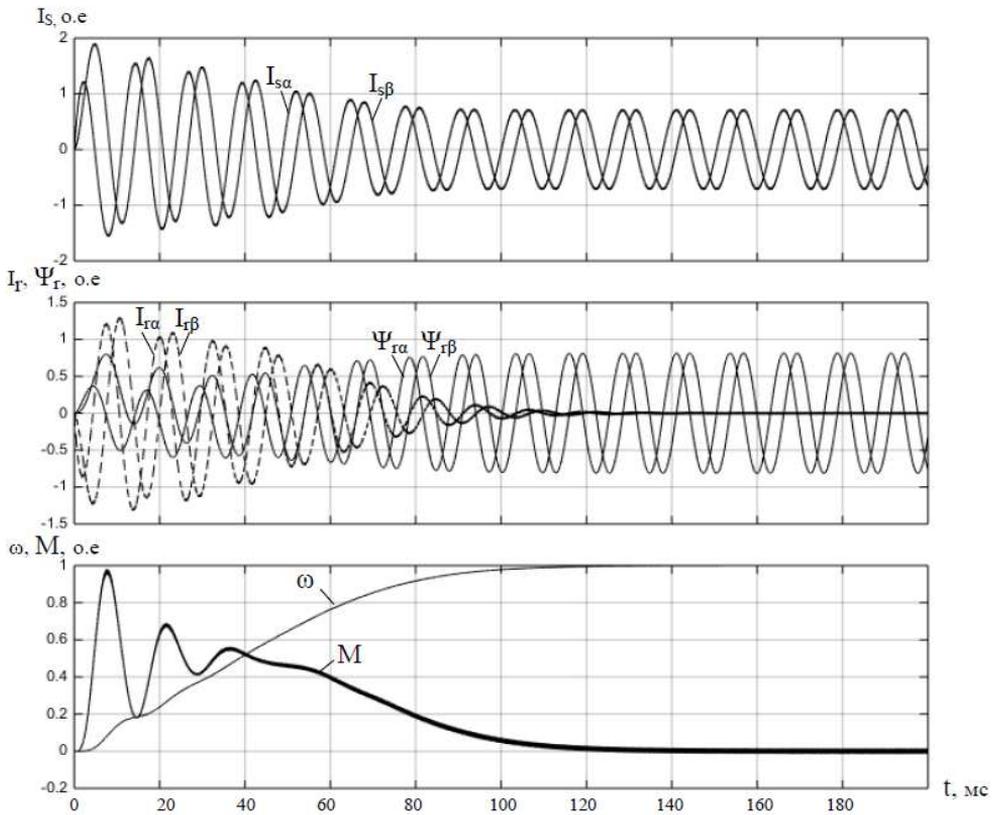


Рис. 4. Графики изменения потокосцепления статора, ротора, тока ротора, момента на валу и угловой скорости

Для реализации комплексного вычислителя предложено решение системы комплексных уравнений (1):

$$\begin{cases} \bar{\Psi}_s^* = \int (\bar{U}_s - \bar{I}_s R_s) dt, \\ \bar{I}_r^* = \frac{\bar{\Psi}_s^*}{X_m} - \bar{I}_s X_s X_m, \\ \bar{\Psi}_r^* = \bar{I}_s X_m + \bar{I}_r X_r, \\ j\omega \bar{\Psi}_r^* = \bar{I}_r^* X_r + \frac{d\bar{\Psi}_r^*}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

При помощи уравнений (2) рассчитываются те параметры, которые не снимаются с датчиков – потокосцепления статора  $\bar{\Psi}_s^*$ , ротора  $\bar{\Psi}_r^*$ , ток ротора  $\bar{I}_r^*$  и угловая скорость  $\omega^*$ .

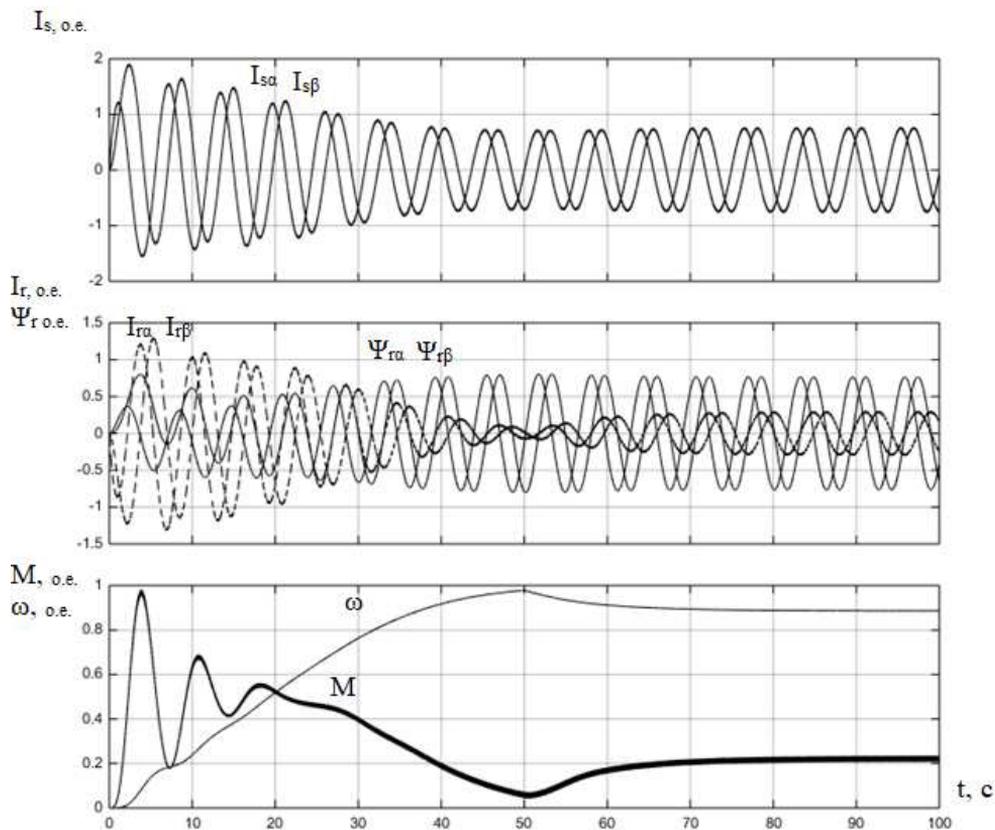


Рис. 5. Характеристики двигателя во время наброса нагрузки

На базе уравнения (2) построена математическая модель вычислителя, представленная на рис. 6.

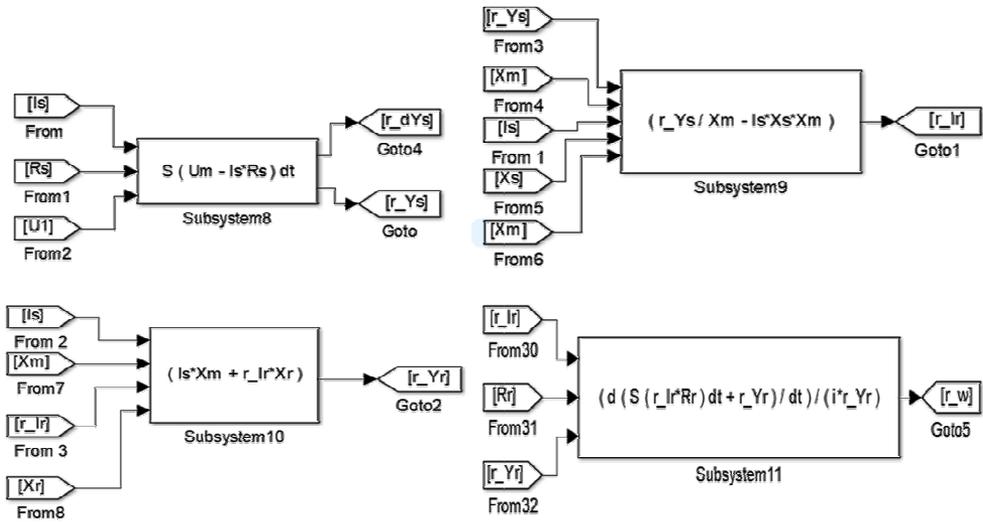


Рис. 6. Структура комплексного вычислителя

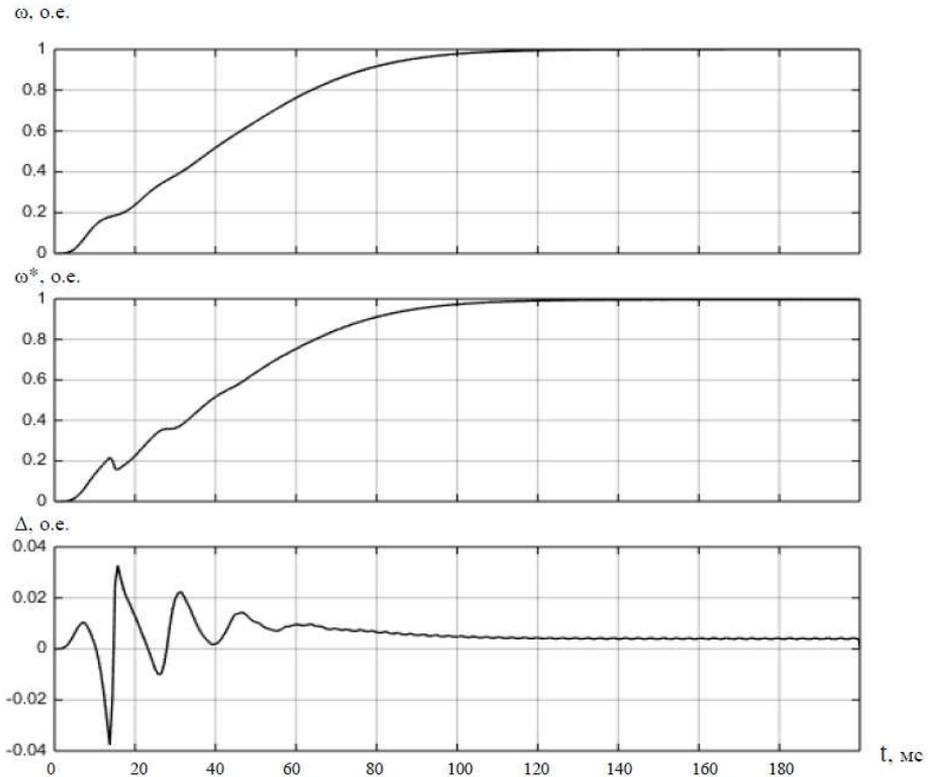


Рис. 7. Анализ работы вычислителя на холостом ходу двигателя

Таким образом, получены все данные, необходимые от вычислителя при реализации векторного управления.

Для проверки корректности работы вычислителя был выполнен ряд экспериментов. Модель двигателя запускалась на холостом ходу. На рис. 7 показаны значения угловой скорости на валу двигателя  $\omega$ , угловой скорости, рассчитанной вычислителем  $\omega^*$ , а также абсолютная разница между полученными значениями  $\Delta$ .

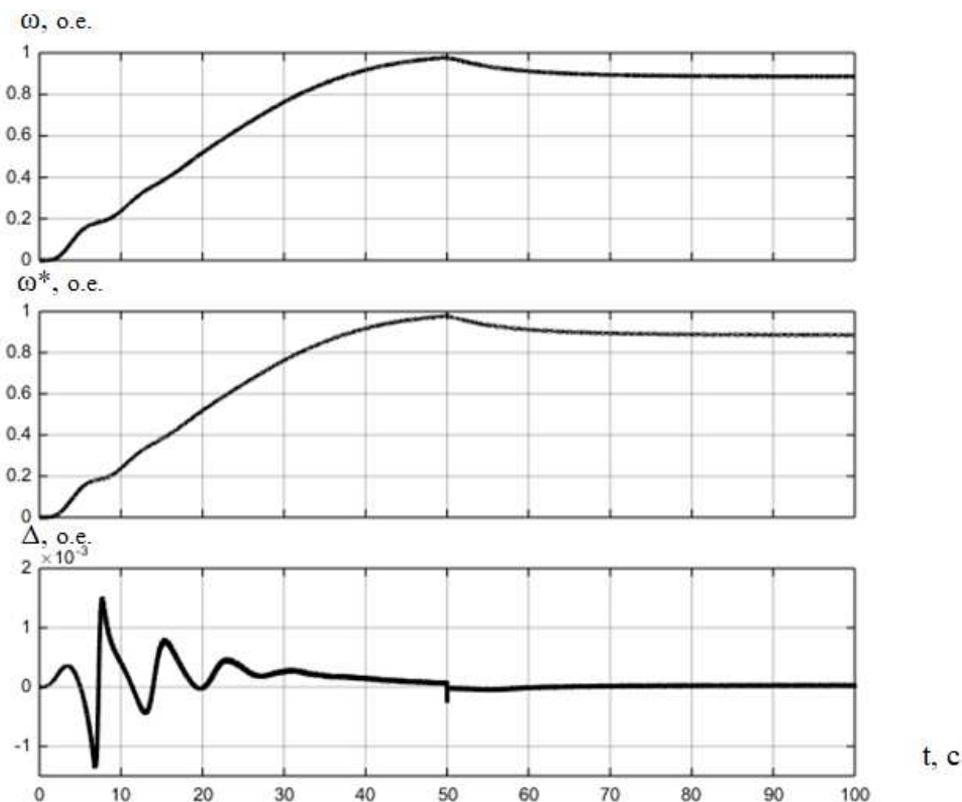


Рис. 8. Анализ работы вычислителя при набросе нагрузки

При низких частотах вращения погрешность достигает 3 %, это связано с плохой идентификацией противоЭДС и широко описано в литературе [15]. По мере разгона двигателя погрешность снижается и приближается к значению 0,5 %. Также было выполнено сравнение показаний модели и вычислителя при набросе нагрузки на валу и при «горячем пуске» (рис. 8). При набросе нагрузки погрешность вычисления остается практически неизменной.

Для исследования работы вычислителя при изменении сопротивления статора в результате воздействия температуры в модель было внесено изменение – сопротивление обмоток статора было увеличено на 10 %, в то время как сопротивление обмоток статора, используемое вычислителем, оставалось неизменным. Данный режим работы соответствует пуску двигателя после непродолжительной паузы, в момент, когда температура обмоток не успела снизиться. Полученные графики представлены на рис. 9.

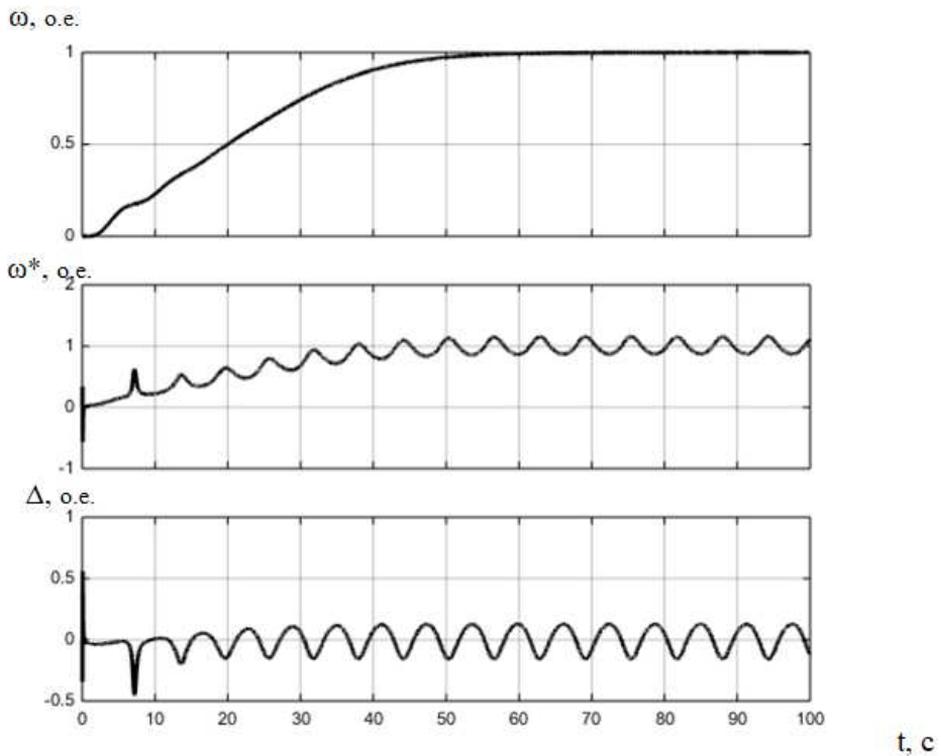


Рис 9. Анализ работы вычислителя при горячем пуске

На низких скоростях погрешность имеет очень большое значение, а на номинальной скорости вращения погрешность имеет пульсирующий характер с амплитудой 13 %.

### Выводы

1. Представлено решение системы уравнений Парка–Горева в комплексном виде.
2. Вычислитель, собранный на основе этого решения, с высокой (0,5 %) точностью определяет значение скорости двигателя.

3. Решение возможно масштабировать и применять в других вариантах электропривода ввиду его универсальности.

4. Получена база для создания системы управления асинхронным двигателем с комплексным вычислителем

### Библиографический список

1. A Method for Permanent Magnet Synchronous Motor Control Based on Single-Loop SVPWM / Q. Zhou [et al.] // Adv. Technol. Teach. – 2012. – No. 9. – P. 333–342.

2. Воробьев В.Е. Основы электромеханики: Письменные лекции. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2003. – 79 с.

3. Method for Controlling Asynchronous Machines: US Patent 3 824 437 / Blaschke F. July 16, 1974.

4. Козлова Л.Е., Тимошкин В.В., Глазырин А.С. Разработка наблюдателя скорости для системы управления асинхронного электропривода с тиристорным регулятором напряжения // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 9–3. – С. 656–661. – URL: <http://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=30328> (дата обращения: 17.05.2019).

5. Вишневский В.И., Лазарев С.А., Митюков П.В. Адаптивный скользящий наблюдатель скорости для бездатчикового асинхронного электропривода // Вестник ЧГУ. – 2010. – № 3. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/adaptivnyu-skolzyaschiy-nablyudatel-skorosti-dlya-bezdatchikovogo-asinhronnogo-elektroprivoda> (дата обращения: 17.05.2019).

6. Глазырин А.С. Бездатчиковое управление асинхронным электроприводом с синергетическим регулятором // Известия ТПУ. – 2012. – № 4. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/bezdatchikovoje-upravlenie-asinhronnym-elektroprivodom-s-sinergeticheskim-regulyatorom> (дата обращения: 17.05.2019).

7. Yan Z., Jin C., Utkin V.I. Sensorless sliding-mode control of induction motors // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2000. – Vol. 47. – P. 1286–1297.

8. Браммер К., Зифлинг Г. Фильтр Калмана–Бьюси: пер. с нем. / под ред. И.Е. Казакова. – М.: Наука, 1982. – 199 с.

9. Dynamic parameters of active rectifiers / M.A. Grigoryev, A.N. Gorozhankin, S.I. Kinas, E.V. Belousov // Russian Electrical Engineering. – 2014. – Vol. 85. – No. 10. – P. 638–640.

10. Косвенное определение составляющих перемещения в электроприводе / Т.А. Функ, Н.М. Сапрунова, Е.В. Белоусов, А.М. Журавлев // Электротехника. – 2015. – № 12.

11. Синергетические методы управления сложными системами: механические и электромеханические системы / под общ. ред. А.А. Колесникова. – М.: Едиториал УРСС, 2006. – 279 с.
12. Веселов Г.Е. Прикладная теория и методы синергетического синтеза иерархических систем управления: дис.... д-ра техн. наук. – Таганрог, 2006. – 332 с.
13. Adaptive intervalcode integrating synchronization of control systems for power converters / L.I. Tsytoovich, O.G. Brylina, M.M. Dudkin, R.M. Rakhmatulin // *Russian Electrical Engineering*. – 2013. – Vol. 84. – No. 3. – P. 122–128.
14. Калачев Ю.Н. Наблюдатели состояния в векторном электроприводе (записки дилетанта). – М., 2015. – 60 с.
15. Способ управления асинхронным тяговым двигателем: пат. Рос. Федерация № 2451389 / Романов И.В., Чудаков П.Л. [и др.]; заяв. 20.05.2012.
16. Балковой А.П., Цаценкин В.К. Прецизионный электропривод с вентильными двигателями. – М.: Изд. дом МЭИ, 2010.
17. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высшая школа, 2001.
18. Муха В.С. Вычислительные методы и компьютерная алгебра: учеб.-метод. пособие. – 2-е изд., испр. и доп. – Минск: Изд-во БГУИР, 2010. – 148 с.
19. Ключников А.Т. Тарировка уравнений асинхронных машин при моделировании в относительных единицах // *Электротехника*. – 2012. – № 3.
20. Ключников А.Т. Уравнения несимметричной многофазной машины в пространственно-временных координатах // *Электричество*. – 1998. – № 7. – С. 36–39.

### **References**

1. Zhou Q. et al. A Method for Permanent Magnet Synchronous Motor Control Based on Single-Loop SVPWM. *Adv. Technol. Teach*, 2012, no. 9, pp. 333-342.
2. Vorob'ev V.E. *Osnovy elektromekhaniki: Pis'mennyye lektsii* [Fundamentals of Electromechanics: Written Lectures]. Saint Petersburg: SZTU, 2003. 79 p.

3. Blaschke F. Method for Controlling Asynchronous Machines: US Patent 3 824 437. July 16, 1974.

4. Kozlova L.E., Timoshkin V.V., Glazyrin A.S. Razrabotka nabliudatelia skorosti dlia sistemy upravleniia asinkhronnogo elektroprivoda s tiristornym reguliatorom napriazheniia [Development of a speed observer for an asynchronous electric drive control system with a thyristor voltage regulator]. *Fundamental'nye issledovaniia*, 2012, no. 9-3, pp. 656-661, available at: <http://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=30328> (accessed 17 May 2019).

5. Vishnevskii V.I., Lazarev S.A., Mitiukov P.V. Adaptivnyi skol'ziashchii nabliudatel' skorosti dlia bezdatchikovogo asinkhronnogo elektroprivoda [Adaptive sliding speed observer for a sensorless asynchronous electric drive]. *Vestnik ChGU*, 2010, no. 3, available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/adaptivnyy-skolzyaschiy-nablyudatel-skorosti-dlya-bezdatchikovogo-asinhronnogo-elektroprivoda> (accessed 17 May 2019).

6. Glazyrin A.S. Bezdatchikovoe upravlenie asinkhronnym elektroprivodom s sinergeticheskim reguliatorom [Sensorless control of an asynchronous electric drive with a synergistic controller]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2012, no. 4, available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/bezdatchikovoe-upravlenie-asinhronnym-elektroprivodom-s-sinergeticheskim-regulyatorom> (accessed 17 May 2019).

7. Yan Z., Jin C., Utkin V.I. Sensorless sliding-mode control of induction motors. *IEEE Trans. Ind. Electron*, 2000, vol. 47, pp. 1286-1297.

8. Brammer K., Zifling G. Fil'tr Kalmana-B'iusi [Kalman-Bucy Filter]. Ed. I.E. Kazakova. Moscow: Nauka, 1982. 199 p.

9. Grigoryev M.A., Gorozhankin A.N., Kinas S.I., Belousov E.V. Dynamic parameters of active rectifiers. *Russian Electrical Engineering*, 2014, vol. 85, no. 10, pp. 638-640.

10. Funk T.A., Saprunova N.M., Belousov E.V., Zhuravlev A.M. Kosvennoe opredelenie sostavliaiushchikh peremeshcheniia v elektroprivode [Indirect determination of the components of the displacement in the electric drive]. *Elektrotekhnika*, 2015, no. 12.

11. Sinergeticheskie metody upravleniia slozhnymi sistemami: mekhanicheskie i elektromekhanicheskie sistemy [Synergistic methods of

control of complex systems: mechanical and electromechanical systems]. Ed. A.A. Kolesnikov. Moscow: Editorial URSS, 2006. 279 p.

12. Veselov G.E. Prikladnaia teoriia i metody sinergeticheskogo sinteza ierarkhicheskikh sistem upravleniia [Applied theory and methods of synergistic synthesis of hierarchical control systems]. Ph. D. thesis. Taganrog, 2006. 332 p.

13. Tsyтович L.I., Brylina O.G., Dudkin M.M., Rakhmatulin R.M. Adaptive intervalcode integrating synchronization of control systems for power converters. *Russian Electrical Engineering*, 2013, vol. 84, no. 3, pp. 122-128.

14. Kalachev Iu.N. Nabludateli sostoianiia v vektornom elektroprivode (zapiski diletanta) [State monitors in the vector drive (notes amateur)]. Moscow, 2015. 60 p.

15. Romanov I.V., Chudakov P.L. et al. Sposob upravleniia asinkhronnym tiagovym dvigatelem [Method of controlling an asynchronous traction motor]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2451389 (2012).

16. Balkovoi A.P., Tsatsenkin V.K. Pretsizionnyi elektroprivod s ventil'nymi dvigateliami [Precision electric drive with valve engines]. Moscow: Moskovskii energeticheskii institut, 2010.

17. Kopylov I.P. Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin [Mathematical modeling of electrical machines]. Moscow: Vysshiaia shkola, 2001.

18. Mukha V.S. Vychislitel'nye metody i komp'iuternaia algebra [Computational Methods and Computer Algebra.]. 2nd ed. Минск: Belorusskii gosudarstvennyi universitet informatiki i radioelektroniki, 2010. 148 p.

19. Kliuchnikov A.T. Tarirovka uravnenii asinkhronnykh mashin pri modelirovanii v otnositel'nykh edinitsakh [Calibration of the equations of asynchronous machines when modeling in relative units]. *Elektrotehnika*, 2012, no. 3.

20. Kliuchnikov A.T. Uravneniia nesimmetrichnoi mnogofaznoi mashiny v prostranstvenno-vremennykh koordinatakh [The equations of an asymmetric multiphase machine in space-time coordinates]. *Elektrichestvo*, 1998, no. 7, pp. 36-39.

### **Сведения об авторах**

**Ключников Анатолий Терентьевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: aklu2011@pstu.ru).

**Турпак Александр Михайлович** – аспирант кафедры «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: Turpak.Alexander@gmail.com).

### **About the authors**

**Klyuchnikov Anatoly Terent'evich** (Perm, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor of Department of Electrical Engineering and Electromechanics Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: aklu2011@pstu.ru).

**Turpak Alexander Mikhailovich** (Perm, Russian Federation) is a Graduate Student of Department of Electrical Engineering and Electromechanics Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: Turpak.Alexander@gmail.com).

Получено 27.01.2020