

## Вычислитель скорости для бездатчикового управления асинхронным двигателем

КЛЮЧНИКОВ А.Т.  
ПНИПУ, Пермь, Россия

*Полвека назад был выдан патент Блашке для векторного управления асинхронным двигателем с датчиком скорости и датчиком Холла. С тех пор считается общепринятым преобразование обобщенных векторов в уравнениях Горева–Парка в виде проекций на оси в разных координатах  $\beta\alpha$ ,  $dq$ ,  $xу$ . При таком подходе для исследования процессов в асинхронном двигателе необходимо решать пять дифференциальных и четыре алгебраических уравнения с перекрестными связями, что неудобно при анализе процессов в машине. В итоге разработано множество вариантов качественных систем управления электродвигателями. Развитие современной вычислительной техники позволяет решать меньшее число уравнений Горева–Парка в комплексной форме без преобразования векторов в виде проекций на координатные оси. В настоящее время нет проблем в реализации операций сложения, умножения комплексных величин в большинстве распространенных языков программирования (фортран, С+, MatCAD, MatLAB и др.). В статье уравнения Горева–Парка решаются в комплексной форме без разложения векторов на проекции в координатах  $\alpha\beta$ ,  $dq$ ,  $xу$ . При этом комплексный вычислитель скорости АД использует только два уравнения напряжений и два уравнения потокоцеплений. Уравнение движения ротора не используется для определения скорости. Полученные алгоритмы решения комплексным вычислителем скорости позволили определить значения токов, электромагнитного момента и момента инерции двигателя. Алгоритмы в системах координат  $\alpha\beta$  и  $xу$  позволили определить скорость двигателя в быстротекущем процессе пуска (0,2 с) с погрешностью менее 1%.*

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** асинхронный двигатель, вычислитель скорости, уравнения Горева–Парка, имитационная модель двигателя, бездатчиковое управление

Широкое применение асинхронного двигателя во всех отраслях промышленности обусловлено, в первую очередь, простотой его конструкции, что определяет высокую надежность и минимальную стоимость в сравнении АД с другими электродвигателями.

Развитие полупроводниковой техники позволило улучшить технико-экономические показатели различных механизмов. Процесс поиска упрощенной системы управления АД показан в данной работе. Следует отметить основные этапы развития систем управления (СУ) при автоматизации различных электротехнических механизмов:

частотное управление по закону Костенко с электромеханическими преобразователями частоты;

тиристорные и транзисторные преобразователи частоты (ПЧ), позволившие регулировать скорость и момент, электрических машин;

векторное управление, впервые предложенное Блашке [1];

наблюдатели параметров системы ПЧ+АД на основе фильтра Кальмана и других авторов [2];

вычисления значений скорости, момента и других параметров на основе нейронных сетей [3].

Отмеченные шаги прогресса в развитии методов управления асинхронными и синхронными двигателями (СД), СД с постоянными магнитами связаны с огромными затратами времени и финансов, которые на порядок превышают затраты на электрические машины. Этим в первую очередь обусловлено решение проблемы создания упрощенных систем управления двигателями.

В статье показан вариант упрощенного метода определения скорости и момента АД применительно к бездатчиковой системе управления на основе уравнений Горева–Парка. Современные компьютеры позволяют исследовать процессы на основе имитационного моделирования; в данном случае использован пакет MatLab Simulink. Такой подход позволяет исключить дорогостоящий эксперимент с электрическими машинами.

Цель работы — разработка метода простого расчета скорости, момента и других параметров АД с бездатчиковым управлением, т.е. создание вычислителя скорости и момента, который может быть

использован в наблюдателях СУ для векторного управления.

Полвека прошло с тех пор, как Блашке получил патент на векторное управление АД с датчиком скорости и датчиком Холла [1]. В патенте подробно представлена структура системы управления, которая базируется на уравнениях Горева–Парка. С тех пор считается общепринятым преобразование обобщенных векторов в уравнениях АД в виде проекций на оси в разных координатах  $\alpha\beta$ ,  $dq$ ,  $xу$  [4–6]. При таком подходе для исследования процессов в двигателе необходимо решать пять дифференциальных и четыре алгебраических уравнения с перекрестными связями. Развитие современной вычислительной техники позволяет решать уравнения Горева–Парка в комплексной форме без преобразования векторов в виде проекций на координатные оси.

Сейчас не существует проблем в реализации операций сложения и умножения комплексных величин в большинстве распространенных языков программирования (фортран, С+, MatCAD, MatLAB и др.). В данной работе реализовано решение уравнений Горева–Парка в комплексной форме без разложения векторов на проекции в координатах  $\alpha\beta$ ,  $dq$ ,  $xу$ .

**Математическое описание уравнений асинхронного двигателя и вычислителя скорости.** Структурные схемы для систем управления (СУ) асинхронного двигателя подробно рассмотрены в работах А.Б. Виноградова, А.М. Зюзева, В.В. Панкратова, А.С. Глазырина, Ю.Н. Калачева и других авторов.

Практически во всех системах управления присутствуют типовые элементы: инвертор с ШИМ, преобразователи координат, регуляторы тока и скорости для управления инвертором с ШИМ. В составе современных бездатчиковых СУ находится наблюдатель, в котором можно выделить вычислитель скорости. Он обрабатывает значения токов и напряжений двигателя и рассчитывает значения угловой скорости и угла  $\theta$ .

Следует отметить, что вычисление скорости и потокосцеплений АД у Блашке [1] не выполняется, так как для этих целей он использует датчики скорости и магнитного потока, которые последующими исследователями не применяются в бездатчиковых СУ.

В данной работе использовано имитационное моделирование – метод замены реального объекта (АД) достаточно точным его описанием с рядом общепринятых допущений обобщенной машины [7]. Целью имитационного моделирования, в первую очередь, является эквивалентное выполнение многократных экспериментов в различных режи-

мах АД и получение необходимых результатов исследований.

Математическое описание асинхронного двигателя основано на уравнениях Горева–Парка для обобщенных векторов в неподвижной системе координат  $\alpha\beta$  в комплексном виде:

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{\Psi}_s}{dt} &= \bar{U}_s - \bar{I}_s R_s; \\ \bar{\Psi}_s &= \bar{I}_s X_s + \bar{I}_r X_m; \\ \bar{\Psi}_r &= \bar{I}_s X_m + \bar{I}_r X_r; \\ \frac{d\bar{\Psi}_r}{dt} &= 0 - \bar{I}_r R_r + j\bar{\Psi}_r \omega; \\ M &= I_\alpha \bar{\Psi}_\beta - I_\beta \bar{\Psi}_\alpha; \\ M_{дв} - M_c &= j \frac{d\omega}{dt}. \end{aligned} \tag{1}$$

Известно, что первые три уравнения использованы для СУ как у Блашке, так и в работах других авторов. Основываясь на системе уравнений (1) в координатах  $\alpha\beta$ , была построена имитационная модель асинхронного двигателя в Matlab Simulink (рис. 1). В процессе исследований использованы общепринятые допущения для обобщенной электрической машины: синусоидальность распределения магнитного потока в воздушном зазоре, отсутствие насыщения и симметрия обмоток статора и ротора [4, 7, 8].

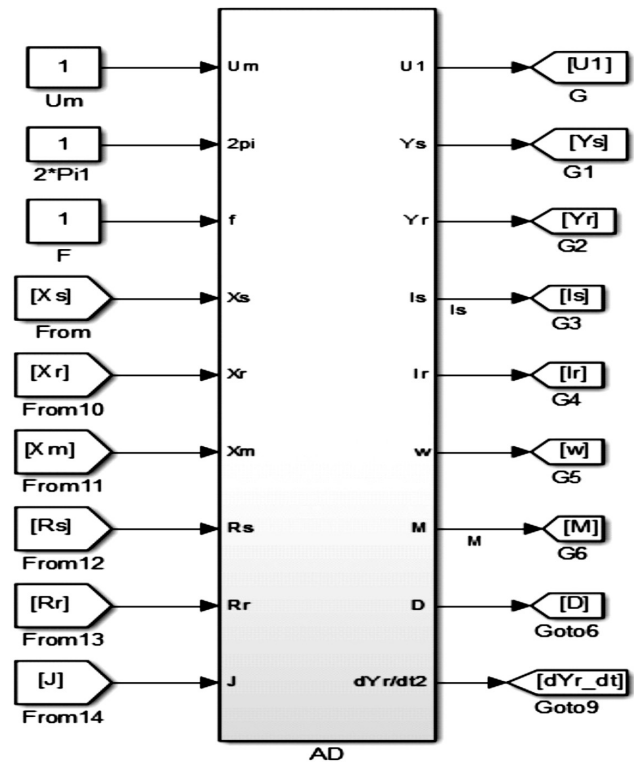


Рис. 1. Входные и выходные параметры имитационной модели АД в координатах  $\alpha\beta$

Для реализации комплексного вычислителя скорости (КВС) выполнены преобразования уравнений (1), что позволило сформировать алгоритм для решения системы уравнений (2) без проекций комплексных векторов на координатные оси  $\alpha\beta$ :

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

В системе уравнений для обобщенных векторов использованы индексы  $s$  – для статора,  $r$  – для ротора, параметры схемы замещения АД в данной работе не меняются [9].

Уравнение движения ротора не используется для определения скорости АД. На основе решения системы уравнений (2) определяются те параметры, которые не снимаются с датчиков: потокосцепления статора  $\bar{\Psi}_s^*$  и ротора  $\bar{\Psi}_r^*$ , ток ротора  $\bar{I}_r^*$  и угловая скорость  $\omega^*$ .

Представленный алгоритм решения уравнений (2) определяет структуру математической модели комплексного вычислителя в координатах  $\alpha\beta$ , которая показана на рис. 2.

Таким образом, при известных параметрах Т-образной схемы замещения электрической машины и «измеренных» значений токов и напряжений двигателя вычислитель определяет все необходимые параметры (скорость, момент и др.), необход-

димые наблюдателю в процессе векторного управления. «Измеренными» токами и напряжениями являются расчетные величины имитационной модели АД. Расчетные значения токов и потокосцеплений комплексного вычислителя в осях  $\alpha\beta$  с высокой точностью совпадают с «измеренными» на имитационной модели АД.

В многочисленных работах по созданию регулируемого электропривода [10,11] авторы используют также синхронные координаты  $xu$  с обоснованным последующим преобразованием в координаты  $dq$ . В данной работе система уравнений (1) преобразована в координаты  $xu$ , на основе которой получены уравнения комплексного вычислителя скорости (3). Эти преобразования позволили сформировать алгоритм для решения системы уравнений (3) без проекций комплексных векторов на координатные оси  $xu$ :

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{\Psi}_s^*}{dt} = \bar{U}_s - \bar{I}_s R_s - j\omega \bar{\Psi}_s^*; \\ \bar{I}_r^* = \bar{\Psi}_s^* / X_m - \bar{I}_s X_s / X_m; \\ \bar{\Psi}_r^* = \bar{I}_s X_m + \bar{I}_r X_r; \\ j(\omega - 1)\bar{\Psi}_r^* = \bar{I}_r^* R_r + \frac{d\bar{\Psi}_r^*}{dt}. \end{aligned} \quad (3)$$

На основе решения системы уравнений (3) определяются параметры, которые не снимаются с датчиков. Для СУ необходимы потокосцепления статора  $\bar{\Psi}_s^*$  и ротора  $\bar{\Psi}_r^*$ , ток ротора  $\bar{I}_r^*$  и угловая скорость  $\omega^*$ . Входными параметрами являются

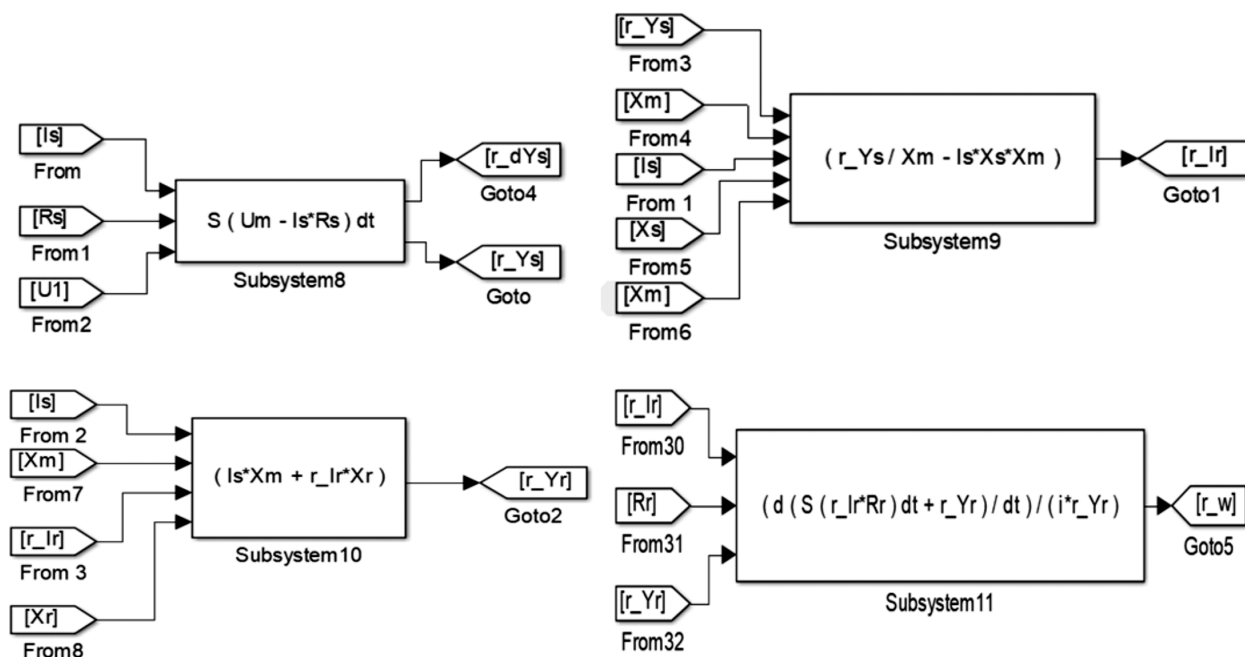


Рис. 2. Структура комплексного вычислителя скорости (оси  $\alpha\beta$ )

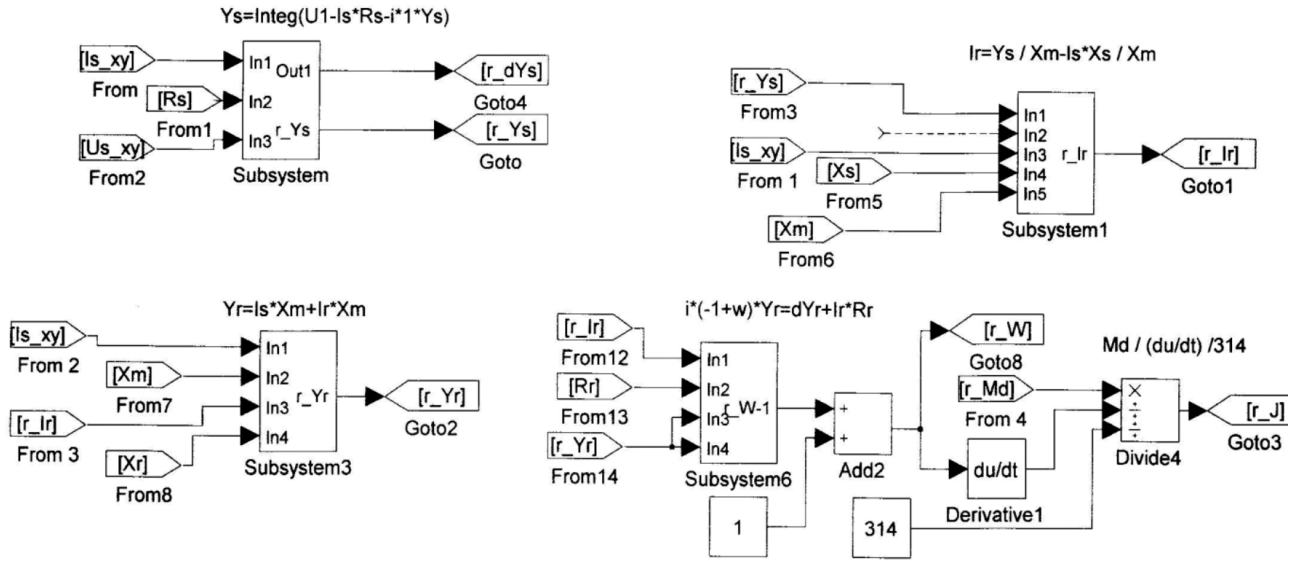


Рис. 3. Структура модели комплексного вычислителя скорости (КВС) в координатах  $\alpha\beta$

«измеренные» токи и напряжения имитационной модели АД в координатах  $\alpha\beta$ . Показанный алгоритм решения уравнений (3) определяет структуру математической модели вычислителя в координатах  $xu$ , которая представлена на рис. 3.

В системе уравнений (3) в сравнении с (2) появились дополнения: в первом уравнении в виде  $j1\bar{\Psi}_s^*$ , что соответствует учету скорости системы координат  $xu$ , равной единице. В четвертом уравнении системы (3), определяющем скорость ротора, появилась компонента  $j(\omega-1)\bar{\Psi}_r^*$ , что также обусловлено скоростью координатной системы  $xu$ .

Эти два дополнения реализованы на рис. 3 в первом блоке структуры *Subsystem* и в четвертом блоке *Subsystem6*. Кроме этого, в четвертом блоке показано определение момента инерции  $J$  на основе уравнения движения ротора АД в режиме холостого хода. Необходимое для определения момента инерции уравнение имеет вид:

$$J = \frac{Md}{d\omega / dt} \tag{4}$$

**Результаты исследований КВС.** Работоспособность представленной модели была подтверждена в режиме пуска на холостом ходу с последующим набросом нагрузки. На рис. 4 показан типовой характер изменения потокосцеплений, токов статора и ротора, момента и угловой скорости [4]. В начале пуска по обмоткам статора и ротора протекает пусковой ток, который в статоре уменьшается до тока холостого хода, а в роторе практически равен нулю. Характерные пульсации момента на валу с последующим спадом при увеличении скорости до

холостого хода подтверждают адекватность модели на рис. 4.

На рис. 4 представлены результаты моделирования пуска АД в режиме холостого хода с последующим набросом нагрузки. В момент времени  $t=50$  рад подключена нагрузка, равная  $0,5\omega^*$ . При этом наблюдается снижение скорости АД, что соответствует реальным физическим процессам в асинхронном двигателе.

В процессе исследования работы вычислителя был выполнен ряд экспериментов. Модель двигателя запускалась на холостом ходу. На рис. 5 пред-

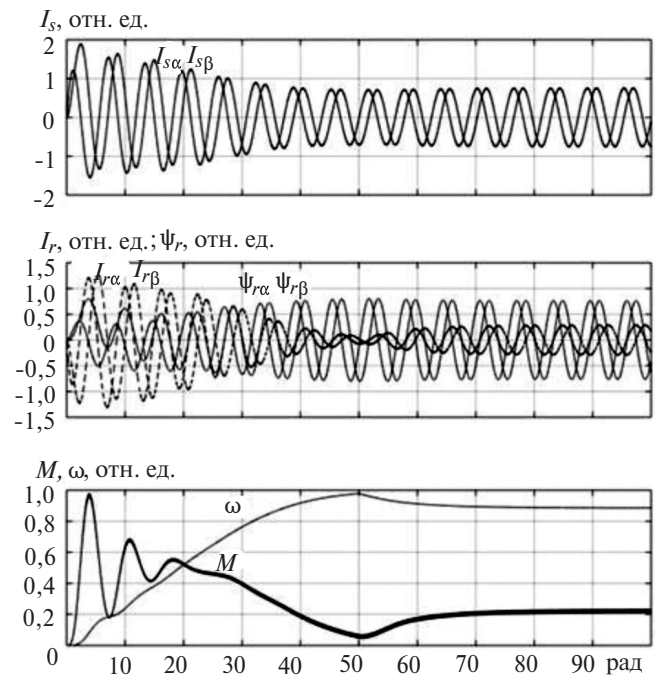


Рис. 4. Временные диаграммы потокосцепления статора, ротора, тока ротора, момента на валу и угловой скорости. (Имитационная модель АД в координатах  $\alpha\beta$ , рис. 2.)



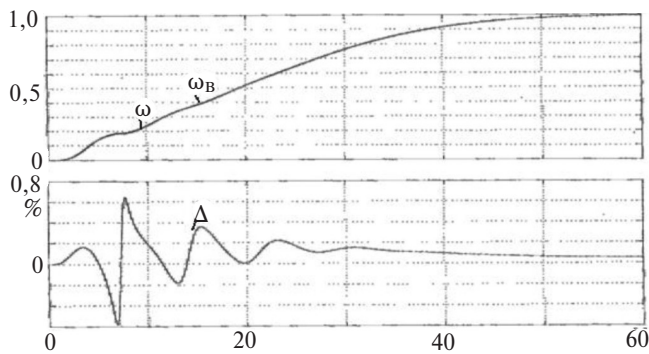


Рис. 5. Скорости и погрешность расчета КВС при пуске АД

ставлены значения угловой скорости на валу «имитационного» двигателя  $\omega$  и угловой скорости  $\omega_B$ , которая определена комплексным вычислителем, показана также абсолютная разница между скоростями  $\Delta$ .

При низких значениях частоты вращения погрешность достигает 0,8%, это связано с запаздыванием расчета вычислителя. По мере разгона двигателя погрешность снижается и приближается к значению 0,05%.

Также сравнивались расчеты скорости имитационной модели  $\omega$  и комплексного вычислителя  $\omega_B$  при набросе нагрузки на валу АД. Погрешность расчетов вычислителя при этом остается практически неизменной.

На рис. 6 показаны результаты исследований имитационной модели в осях  $\alpha\beta$  (проекция тока статора  $I_\alpha + jI_\beta$ ) и проекция тока статора в осях  $xu$  ( $I_x + jI_y$ ). В процессе решения систем уравнений (2) и (3) имитационной модели АД и вычислителя скорости использованы параметры двигателя 4A80B6.

В результате сравнения модулей токов в осях  $\alpha\beta$  и в осях  $xu$  получена погрешность, равная нулю. Например, в момент времени  $t$  (19 рад) модули равны единице ( $I_\alpha = 0, I_\beta = 1, I_y = 0, I_x = 1$ ). Значения

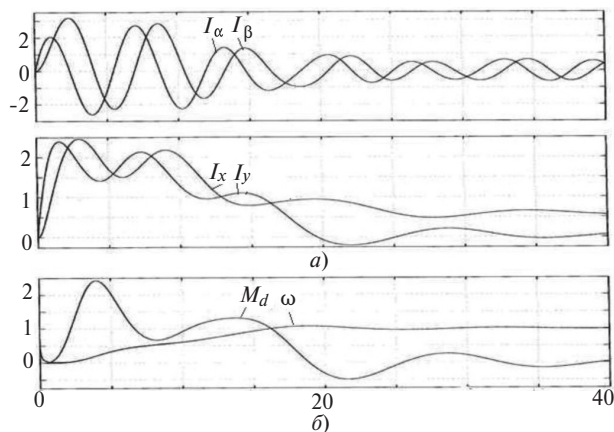


Рис. 6. Токи имитационной модели  $I_\alpha + jI_\beta$  и вычислителя  $I_x + jI_y$  (а); момент  $M_d$  и скорость  $\omega$  в координатных осях  $\beta\alpha$  и  $xu$  (б)

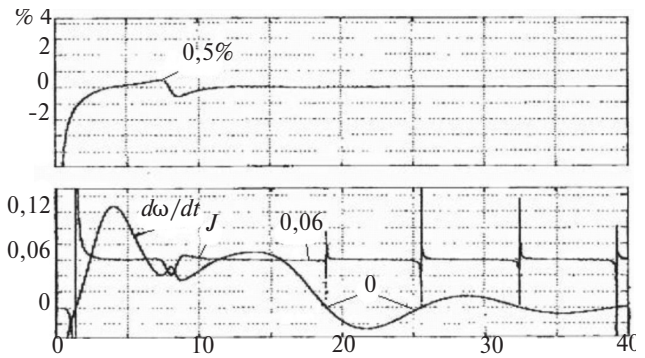


Рис. 7. Изменение погрешности расчета скорости, а также производная скорости и момент инерции при пуске АД

момента и скорости АД в осях  $\alpha\beta$  (имитационная модель) и  $xu$  (вычислитель) на графике совпадают, что не позволяет оценить погрешность расчета вычислителя на рис. 6.

На рис. 7 показано значение погрешности комплексного вычислителя при пуске АД на холостом ходу, которое практически равно нулю и кратковременно 0,5%. Нулевая погрешность подтверждает высокую точность расчетов вычислителя токов, потокосцеплений, момента и скорости АД. На рис. 7 показаны результаты расчета момента инерции АД на основе определения ускорения – производной от скорости ротора, что возможно в процессе разгона, когда скорость меняется от нуля до максимальной. В установившемся режиме скорость постоянна, следовательно, момент инерции не определяется. Значение момента достаточно точно определено на отрезке времени (10–18 рад) и равно 0,06 кгм<sup>2</sup>. Следует отметить, что когда производная от скорости равна нулю (18 и 26 рад), момент инерции закономерно не определяется.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Blaschke F. Method for Controlling Asynchronous Machines. US Patent 3 824 437, Июль 16, 1974.
2. Калачев Ю.Н. Наблюдатели состояния в векторном электроприводе (записки дилетанта). М., 2015, 60 с.
3. Yan Z., Jin C., Utkin V.I.. Sensorless sliding-mode control of induction motors. — IEEE Trans. Ind. Electron, 2000, vol. 47, pp. 1286–1297.
4. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. М.: Высшая школа, 2001, 328 с.
5. Фираго Б.И., Васильев Д.С. Векторные системы управления электроприводами. Минск: Высшая школа, 2016, 159 с.
6. Глазырин А.С. Бездатчиковое управление асинхронным электроприводом с синергетическим регулятором. — Изв. ТПУ, 2012, № 4 [Электрон. ресурс] <https://cyberleninka.ru/article/n/bezdatchikovoe-upravlenie-asinhronnym-elektroprivodom-s-sinergeticheskim-regulyatorom> (дата обращения 17.05.2019).
7. Ключников А.Т. Уравнения несимметричной многофазной машины в пространственно-временных координатах. — Электричество, 1998, № 7, с. 36–39.
8. Ключников А.Т. Тарировка уравнений асинхронных машин при моделировании в относительных единицах. — Электротехника, 2012, № 3.

9. **Мошинский Ю.А., Беспалов В.Я., Корякин А.А.** Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным. — *Электричество*, 1998, № 4, pp. 38–42.

10. **Панкратов В.В., Котин Д.А.** Адаптивные алгоритмы бездатчикового векторного управления асинхронными электроприводами подъемно-транспортных механизмов, Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2012, 143 с.

11. **Виноградов А.Б.** Векторное управление электроприводами переменного тока. Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2008, 298 с.

[30.07.2020]



*А в т о р:* **Ключников Анатолий Терентьевич** — кандидат техн. наук, доцент Пермского национального исследовательского политехнического университета.

*Electrichestvo*, 2021, No. 2, pp. 54–59

DOI:10.24160/0013-5380-2021-2-54-59

## A Speed Observer for Sensorless Control of an Induction Motor

**KLYUCHNIKOV Anatoly T.** (*Permskiy National Research Polytechnic University, Perm', Russia*) — Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

*Half a century has passed since the time F. Blaschke received a patent for vector control of an induction motor with a speed sensor and a Hall sensor. Since that time, the transformation of generalized vectors in the Park–Gorev equations as projections on the axes in different coordinate frames  $\alpha\beta$ ,  $dq$ , and  $xy$  has been regarded to be a commonly accepted one. With this approach, five differential and four algebraic equations with cross-links have to be solved for studying the processes in an induction motor, which involves certain inconvenience of analyzing the processes in the machine. Eventually, many versions of high-quality electric motor control systems have been developed. Owing to the progress achieved in computer engineering, it has become possible to solve a fewer number of the Park–Gorev equations in complex form without decomposing the vectors into projections on the coordinate axes  $\alpha\beta$ ,  $dq$ ,  $xy$ . At present, the majority of widely used programming languages (FORTRAN, C+, MathCAD, MatLAB, etc.) offer efficient tools for implementing the operations of summing and multiplying complex quantities. In the article, the Park–Gorev equations are solved without decomposing the vectors into their projections on the coordinate axes  $\alpha\beta$ ,  $dq$ ,  $xy$ . In so doing, the induction motor complex speed observer uses only two voltage equations and two flux linkage equations. The rotor motion equation is not used to determine the speed. The obtained algorithms for solving by means of a complex speed observer made it possible to determine the currents, electromagnetic torque and motor's moment of inertia. The proposed algorithms written in the  $\alpha$ - $\beta$  and  $x$ - $y$  coordinate systems made it possible to determine the motor speed in its fast start-up process (0.2 s) with an error of less than 1%.*

**Key words:** *induction motor, speed observer, Park–Gorev equations, motor simulation model, sensorless control*

### REFERENCES

1. **Blaschke F.** Method for Controlling Asynchronous Machines. US Patent 3 824 437, Iyul' 16 (Method for Controlling, 1974).
2. **Kalachev Yu.N.** *Nablyudateli sostoyaniya v vektornom elektroprivode (zapiski diletanta)* (Observers of the state in the vector electric drive (notes of an amateur). M., 2015, 60 p.
3. **Yan Z., Jin C., Utkin V.I.** Sensorless sliding-mode control of induction motors. — *IEEE Trans. Ind. Electron*, 2000, vol. 47, pp. 1286–1297.
4. **Kopylov I.P.** *Matematicheskoye modelirovaniye elektricheskikh mashin* (Mathematical modeling of electrical). M.: Vysshaya shkola, 2001, 328 p.
5. **Firago, B.I., Vasil'yev D.S.** *Vektornyye sistemy upravleniya elektroprivodami* (Vector control systems for electric drives. Minsk: Vysshaya shkola, 2016, 159 p.
6. **Glazyrin A.S.** *Bezdatchikovoye upravleniye asinkhronnym elektro-privodom s sinergeticheskim regulyatorom.* — *Izv. TPU*, 2012, No. 4 [Elektron. resourse] <https://cyberleninka.ru/article/n/bezdatchikovoe-upravlenie-asinkhronnym-elektroprivodom-s-sinergeticheskim-regulyupravl> (Date of appeal 17.05.2019).
7. **Klyuchnikov A.T.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1998, No. 7, pp. 36–39.
8. **Klyuchnikov A.T.** *Elektrotehnika – in Russ. (Electrical Engineering)*, 2012, No. 3.
9. **Moshchinskiy Yu.A., Bepalov V.Ya., Koryakin A.A.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1998, No. 4, pp. 38–42.
10. **Pankratov V.V., Kotin D.A.** *Adaptivnyye algoritmy bezdatchikovogo vektornogo upravleniya asinkhronnymi elektroprivodami pod'yemno-transportnykh mekhanizmov* (Adaptive algorithms for sensorless vector control of asynchronous electric drives). Ivanovo: Ivanovskiy gosudarstvennyy energeticheskiy universitet im. V.I. Lenina, 2012, 143 p.
11. **Vinogradov A.B.** *Vektornoye upravleniye elektroprivodami pe-remennogo toka* (Vector control of AC drives. Ivanovo: Ivanovskiy gosudarstvennyy energeticheskiy universitet im. V.I. Lenina, 2008, 298 p.

[30.07.2020]

