

DOI: 10.15593/2224-9397/2020.1.07

УДК 681.513.7

**С.А. Попов, В.И. Кривченков**

Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия

## **ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПОСТОЯННОЙ ВРЕМЕНИ ЯКОРНОЙ ЦЕПИ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

В современных системах управления всё чаще наблюдается тенденция к увеличению алгоритмической (программной) их части и, соответственно, к уменьшению части аппаратной. При таком подходе к управлению используется модель объекта, точность которой оказывает существенное влияние на качество процессов в системе. Следовательно, разработка методов нахождения параметров объекта является весьма перспективной. Так, при отсутствии непосредственных обратных связей в системе управления электроприводом определение требуемых переменных состояния может быть произведено косвенным путем по модели объекта. На точность модели якорной цепи электродвигателя постоянного тока большое влияние оказывает погрешность определения постоянной времени этой цепи. **Цель исследования:** разработка методики идентификации постоянной времени якорной цепи двигателя и, следовательно, уточнения параметров его модели в системе управления. **Методы:** создание системы идентификации на основе замены якорной цепи двигателя RL-цепью; проведение моделирования системы идентификации в графической среде имитационного моделирования Simulink и оптимизация параметров. **Результаты:** уточнение параметров модели электродвигателя постоянного тока используется при косвенной оценке его параметров. Приведенная методика идентификации постоянной времени якорной цепи электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения основана на приближенной замене данной цепи RL-цепью. Постоянная времени определяется путем нахождения касательной к графику изменения тока в данной цепи на основании значений измеренного в определенный момент времени тока и установившегося значения тока. Полученная система позволяет уточнить параметры двигателя, необходимые для правильного функционирования системы управления. Возможность косвенного измерения скорости электродвигателя при малой ошибке дает возможность отказаться от применения устройств для непосредственного измерения, например энкодеров. **Практическая значимость:** с помощью предлагаемой системы идентификации повышаются качество регулирования бездатчиковых систем и надежность всего привода. Указанная методика может быть также применена для определения параметров электродвигателей переменного тока (статорной цепи). Однако в целях упрощения модели объекта рассматривается именно машина постоянного тока.

**Ключевые слова:** электродвигатель, электропривод, измерение, идентификация, постоянная времени, система управления, двигатель постоянного тока, моделирование.

**S.A. Popov, V.I. Krivchenkov**

Kuban State Technological University, Krasnodar, Russian Federation

## **IDENTIFICATION OF THE TIME CONSTANT OF DC MOTOR ROTOR**

In modern control systems, there is an upward trend to increase its algorithmic (software) part and, accordingly, to decrease the hardware part. With this approach, an object model is used, the accuracy of which significantly affects the quality of processes in the system. Therefore, the development of methods for finding the parameters of control object is very promising. Thus, in the absence of direct feedbacks in the drive control system, the determination of the required state variables can be carried out indirectly by the object model. Accuracy of the rotor circuit model of DC motor to a large extent depends on the accuracy of the rotor circuit time constant determination. **Purpose:** development of methods for identifying the time constant of the motor rotor circuit and, therefore, clarifying parameters of its model in the control system. **Methods:** creating an identification system based on replacing the motor rotor circuit with an RL-circuit; simulation of an identification system in a graphical environment of Simulink simulation modeling and optimization of parameters. **Results:** refinement of parameters of DC motor model used in the indirect assessment of its parameters. The methodology for identifying the rotor time constant in DC motor based on the approximate replacement of this circuit with an RL-circuit. The time constant determination carried out by finding the tangent to the graph of current in this circuit and based on the values of the current measured at a certain time and the steady-state current value. The resulting system allows you to specify the motor parameters necessary for the proper functioning of the control system. The ability to indirect measurement of the electric motor speed with a small error allows you to abandon the use of devices for direct measurement, e.g. encoders. **Practical relevance:** this identification system improves the control quality of sensorless systems and entire drive reliability. The proposed method can also work to determine the parameters of AC motors (stator circuit). However, in order to simplify the object model we consider DC machine.

**Keywords:** electric motor, electric drive, measurement, identification, time constant, control system, DC motor, modeling

**Введение.** Электродвигатели постоянного тока (ДПТ) независимого возбуждения [1, 2] в настоящее время вытесняются машинами переменного тока, однако в области малых мощностей (с возможностью возбуждения от постоянных магнитов [3]) ДПТ по-прежнему продолжают использоваться. Классические методы регулирования переменных состояния ДПТ [4] не позволяют достичь высокого качества регулирования, поэтому в электроприводе постоянного тока применяется управление с помощью транзисторного преобразователя.

Замыкание системы управления электроприводом по одной (или нескольким) из переменных состояния позволяет стабилизировать ее значение благодаря тому, что в системе имеется сигнал о непосредственном значении данной переменной. Необходимость в непосредственном измерении переменных состояния (например, скорости вращения) с развитием систем управления и увеличением их быстродействия

оказалась под вопросом. Косвенная оценка этих величин широко применяется в различных типах электропривода.

**Постановка задачи.** Рассмотрим пример с нахождением значения скорости вращения привода. При непосредственном ее измерении требуется применение дополнительных технических средств – тахогенераторов, датчиков с инициаторами, энкодеров. Это не только повышает стоимость всей установки, но и снижает ее надежность.

Непрямое измерение переменных состояния привода, или их оценка, позволяет избавиться от указанных выше недостатков. Структура, которая оценивает какую-либо величину по косвенным признакам, называется наблюдателем [5, 6, 7]. Структурная схема наблюдателя показана на рис. 1.

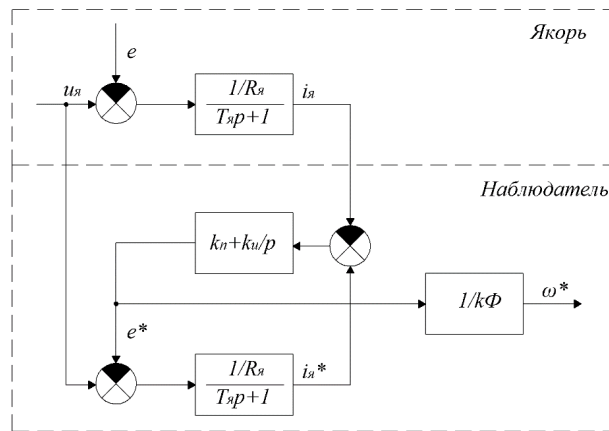


Рис. 1. Наблюдатель скорости

Оценивающая часть здесь состоит из модели якоря двигателя и ПИ-регулятора. При таком подходе необходимо достаточно точно знать параметры модели двигателя, что не всегда представляется возможным. Таким образом, перед нами встает задача определения параметров объекта регулирования – электродвигателя, а именно постоянной времени его якорной цепи. Здесь стоит также отметить, что подобная задача возникает и при управлении приводом переменного тока во время нахождения параметров статорной цепи.

**Цель исследования.** Из описанного выше можно сделать вывод, что целью разработки методики идентификации постоянной времени якорной цепи двигателя является уточнение параметров его модели в системе управления.

Поскольку идентификация должна проводиться при вводе в эксплуатацию привода, либо при его включении, скорость этого процесса не столь принципиальна. Тем не менее простота и скорость метода будут его значительным преимуществом. Следовательно, необходимо также стремиться к минимизации ресурсов, требуемых для расчета.

**Варианты методов идентификации.** В настоящее время известны различные методы идентификации параметров электродвигателей.

В [8] идентификация параметров двигателя проводится с помощью поисковых методов путем минимизации суммарного квадратичного отклонения тока. Данный метод требует большого количества вычислений, а также дает значительную погрешность измерения индуктивности (и вычисляемой из нее постоянной времени).

В [9] в целях получения значений параметров модели двигателя используется метод роя частиц. По сравнению с [8] погрешность оценки здесь значительно ниже, однако метод не отличается высоким быстродействием.

В [10] в ходе исследования беспоиcкового метода активной предварительной идентификации параметров асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при линейном изменении напряжения статора было выявлено, что величину индуктивности статора возможно оценить только после продолжительного интервала времени, что, в свою очередь, приводит к выходу на ограничение по ресурсу преобразователя или к недопустимым значениям тока статора.

Приведенная в [11] методика идентификации индуктивности статорной обмотки вентильного двигателя производится по временной зависимости тока с импульсным тестовым сигналом. В процессе определения индуктивности ротор двигателя ориентируется по оси  $d$ , что может быть нежелательно при работе с двигателем в составе какого-либо механизма (возможно обратное вращение, способное привести к поломке присоединенных механизмов).

Различные методики идентификации параметров электрических машин и других динамических систем приведены также в [12–16].

**Суть предлагаемого метода.** По приведенной в [10] классификации предлагаемый метод можно отнести к активной предварительной идентификации параметров электродвигателя. Это означает, что система настраивается в начале работы (предварительно) и для настройки применяется специальное тестовое воздействие.

Суть разработанного метода идентификации постоянной времени состоит в следующем. Если представить якорную цепь двигателя постоянного тока как RL-цепь, то можно определить постоянную времени этой цепи по касательной к графику переходного процесса тока [17, 18], проходящей из точки 0; 0 (рис. 2). Если измерить ток  $I_{\text{изм}}$  в известный момент времени  $T_{\text{изм}}$ , то, применяя свойства подобных треугольников  $OA T_{\text{изм}}$  и  $OA T_a$  (рис. 2), можно определить постоянную времени якорной цепи по выражению

$$\frac{T_a}{I_{\text{уст}}} = \frac{T_{\text{изм}}}{I_{\text{изм}}}, \quad (1)$$

где  $T_a$  – постоянная времени якоря,  $I_{\text{уст}}$  – установившееся значение тока RL-цепи,  $T_{\text{изм}}$  – момент времени, в который происходит измерение тока,  $I_{\text{изм}}$  – измеренный ток.

Отсюда имеем:

$$T_a = \frac{I_{\text{уст}}}{I_{\text{изм}}} \cdot T_{\text{изм}}. \quad (2)$$

В уравнении (2) величина  $T_{\text{изм}}$  является моментом времени, в который происходит измерение тока двигателя. В случае, когда двигатель приводится в действие транзисторным преобразователем, она не может быть меньше некомпенсируемой постоянной времени  $T_{\mu}$ , равной периоду ШИМ. Но практически она будет зависеть от времени цикла системы регулирования.

Тестовое задающее воздействие на электродвигатель (задание скорости) должно быть такой величины, чтобы ток достигал максимального значения. При работе двигателя в системе подчиненного регулирования [19] в случае слишком низкого значения задания скорости этого может не произойти, вследствие чего постоянная времени по (2) будет определена неверно. Тестовый сигнал также может быть объединен с рабочим заданием в случае его удовлетворительного значения для указанных выше условий. Кроме того, необходимо наличие в системе положительной обратной связи по ЭДС для компенсации ее влияния на величину и динамику тока якоря.

**Моделирование системы идентификации.** Проведем моделирование системы идентификации постоянной времени якоря в Simulink

[20]. Пуск двигателя осуществляется в системе подчиненного регулирования (рис. 3) с наличием положительной обратной связи по ЭДС [5], коэффициент которой

$$k_{\text{посс}} = \frac{k\Phi}{U_{DC}}, \quad (3)$$

где  $k\Phi$  – конструктивный коэффициент двигателя,  $U_{DC}$  – напряжение питания.

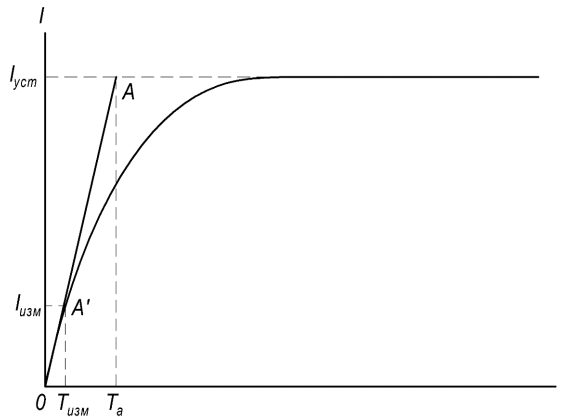


Рис. 2. Переходный процесс тока в RL-цепи

Передаточные функции регуляторов тока и скорости и преобразователя [5, 21]:

$$W_{p.m}(p) = \frac{1}{2T_{\mu}p + 1}; \quad (4)$$

$$W_{p.c}(p) = \frac{J}{4T_{\mu} \cdot k\Phi}; \quad (5)$$

$$W_n(p) = \frac{U_{DC}}{T_n p + 1}, \quad (6)$$

где  $T_{\mu}$  – некомпенсируемая постоянная времени,  $T_n$  – постоянная времени преобразователя.

Параметры двигателя и преобразователя:

$$T_a = 0,075 \text{ с}; k\Phi = 0,0514 \text{ В} \cdot \text{с/рад}; J = 0,01 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$U_{DC} = 24 \text{ В}; T_n = T_{\mu} = 10^{-4} \text{ с}, \quad (7)$$

где  $J$  – момент инерции двигателя.

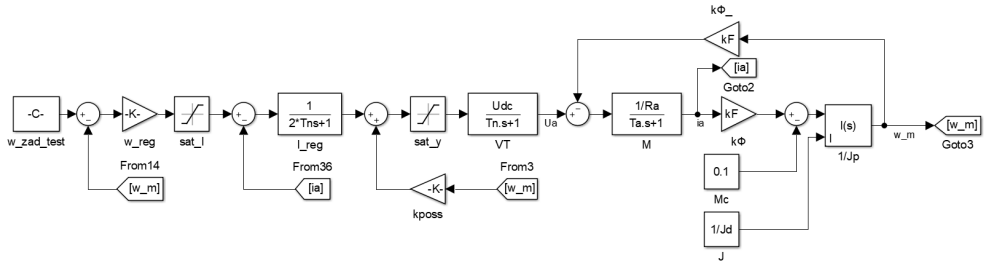


Рис. 3. Система управления двигателем

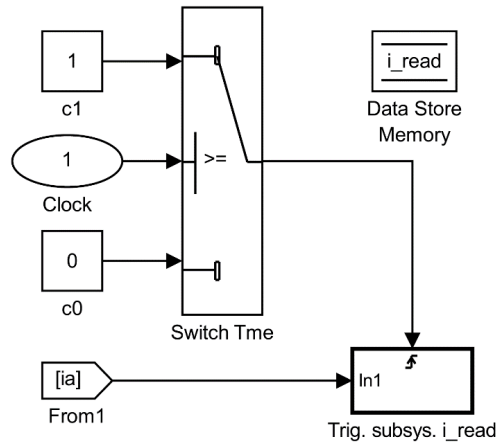


Рис. 4. Запись тока якоря в момент времени измерения

На рис. 4 показана структура, записывающая величину тока в заданный момент времени  $T_{изм}$ . Запись происходит в поименованную область памяти  $i\_read$ , откуда впоследствии читается значение  $I_{изм}$ .

Кроме измеренного значения тока якоря нам необходимо также знать величину установившегося тока, которую при наличии незначительного перерегулирования можно принять равной максимальному значению. Ниже на рис. 5 представлена модель, записывающая значения тока в массив в определенные промежутки времени (в данном случае каждые 0,1 с). Затем этот массив записывается в область памяти  $i\_max$ .

Далее массив с записанными значениями тока якоря проходит через блок вычисления максимального значения (рис. 6). И, наконец, производится вычисление постоянной времени  $T_a$ . Принимая, что  $T_\mu = 10^{-4}$  с, можно провести оптимизацию системы по параметру  $T_{изм}$  в (2), минимизируя при этом ошибку расчета постоянной времени (блок  $Ta\_err\_%$  на рис. 6).

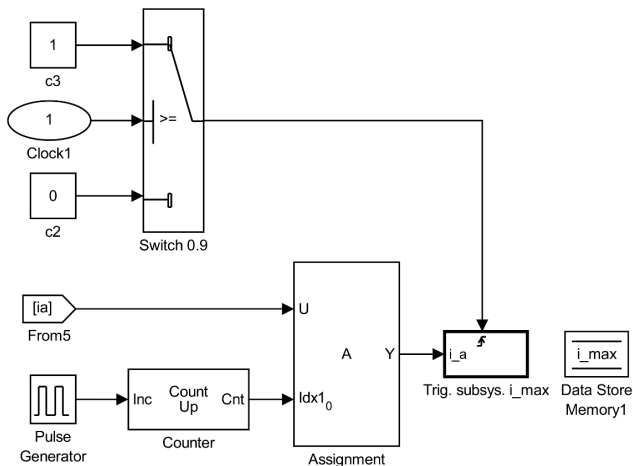


Рис. 5. Нахождение установившегося значения тока

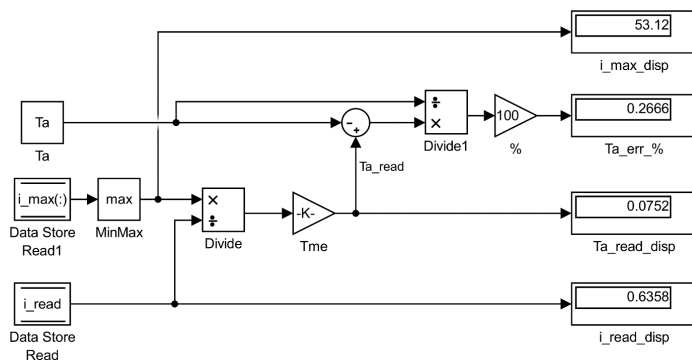


Рис. 6. Вычисление постоянной времени

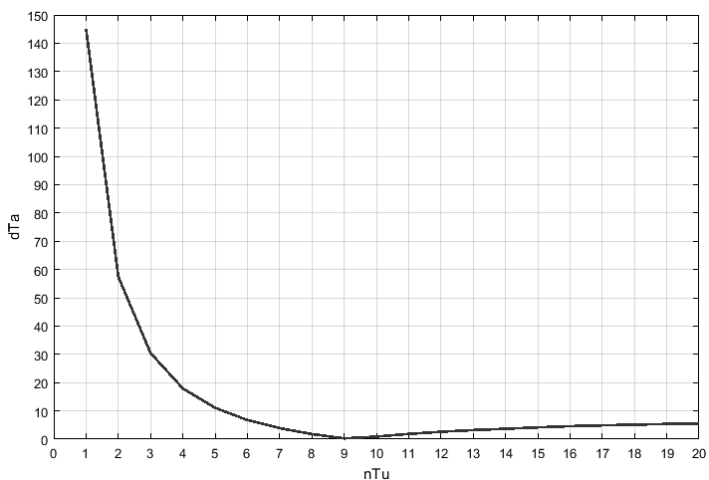


Рис. 7. Зависимость ошибки от времени измерения



Измерение значений тока якоря для нахождения его максимального значения производилось каждые 0,1 с. Запись массива этих значений происходила спустя 1 с после запуска. Таким образом, количество выборок значений тока равно 10. Увеличение количества выборок, согласно экспериментальным данным, не дает существенного снижения ошибки вычисления постоянной времени. Поэтому в целях увеличения быстродействия при нахождении максимального значения массива увеличивать количество выборок нецелесообразно.

На представленном на рис. 7 графике заметно оптимальное значение времени измерения тока. Здесь это время показано в «количестве  $T_{\mu}$ ». При времени измерения, равном девятикратному значению некомпенсируемой постоянной времени, ошибка минимальна и равна 0,2666 % (см. рис. 6).

**Выводы.** Предложенная методика идентификации постоянной времени электродвигателя дает достаточно точную оценку требуемой величины. Это, в свою очередь, позволяет улучшить качество системы управления приводом.

При незначительной ошибке оценки и достаточно высоком быстродействии система идентификации требует измерения максимального (установившегося) значения тока якоря, что, в свою очередь, может быть затруднительно при наличии ограничения по току в системе управления двигателем. Кроме того, точность определения постоянной времени зависит от точности измерения токов и, как следствие, разрядности АЦП и других параметров цифровой обработки сигналов [22]. Описанные проблемы могут быть решены применением специальных алгоритмов начальной идентификации привода (где, например, будет кратковременно отключаться ограничение по току), а также использованием современных электронных компонентов, обладающих требуемыми характеристиками (быстрые микроконтроллеры и цифровые сигнальные процессоры, высокоточные АЦП).

Представленная методика рассмотрена в применении к двигателю постоянного тока, однако в дальнейшем планируется ее распространение на приводы переменного тока с более сложными системами управления. Также имеются перспективы практической реализации смоделированного алгоритма идентификации на микроконтроллере.

### Библиографический список

1. Копылов И.П. Электрические машины: учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. – М.: Высшая школа: Логос, 2000. – 607 с.
2. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: учебник для вузов. – СПб.: Питер, 2008. – 320 с.
3. James Kirtley Jr. 6.685 Electric Machines. Fall 2013. Massachusetts Institute of Technology: MIT OpenCourseWare [Электронный ресурс]. – URL: <https://ocw.mit.edu> (дата обращения: 24.09.2019).
4. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод: учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 416 с.
5. Анучин А.С. Системы управления электроприводов: учебник для вузов. – М.: Изд. дом МЭИ, 2015. – 373 с.
6. Кривченков В.И., Попов С.А. Исследование видов наблюдателей для бездатчиковых систем управления электроприводом постоянного тока // Развитие современной науки: теоретические прикладные аспекты / под общ. ред. Т.М. Сигитова. – Пермь: ИП Сигитов Т.М., 2017. – С. 23–26.
7. Калачев Ю.Н. Наблюдатели состояния в векторном электроприводе [Электронный ресурс]. – URL: [http://privod.news/files/nabludateli\\_10.16\\_1.pdf](http://privod.news/files/nabludateli_10.16_1.pdf) (дата обращения: 24.09.2019).
8. Гаргаев А.Н., Каширских В.Г. Идентификация параметров двигателей постоянного тока с помощью поисковых методов // Вестник Кузбас. гос. техн. ун-та. – 2013. – № 1(95). – С. 131–134.
9. Гаргаев А.Н., Каширских В.Г. Идентификация параметров двигателей постоянного тока с помощью метода роя частиц // Вестник Кузбас. гос. техн. ун-та. – 2015. – № 4(110). – С. 71–75.
10. Панкратов В.В., Кучер Е.С. Анализ методов предварительной идентификации постоянной времени ротора асинхронного двигателя в системах электропривода // Научный вестник Новосиб. гос. техн. ун-та. – 2012. – № 1(46). – С. 127–134.
11. Параметры вентильного двигателя с постоянными магнитами / И.Н. Радимов, М.В. Гулый, В.В. Рымша, Чан Тхи Тху Хыонг // Электротехника и электромеханика. – Харьков: Изд-во Нац. техн. ун-та «Харьков. политехн. ин-т», 2008. – № 6. – С. 40–43.

12. Овчаренко В.Н. Адаптивная идентификация параметров в динамических и статических системах // Автоматика и телемеханика. – 2011. – № 3. – С. 113–123.

13. Солодкий Е.М., Даденков Д.А., Костыгов А.М. Параметрическая идентификация асинхронного двигателя на основе алгоритма фазовой автоподстройки частоты // Электротехника. – 2018. – № 11. – С. 53–57.

14. Однолько Д.С. Совместная идентификация активного сопротивления статора и ротора асинхронного двигателя на интервале широтно-импульсной модуляции // Электротехника. – 2013. – № 5. – С. 16–20.

15. Волков А.В., Скалько Ю.С. Идентификация потокосцепления ротора и скорости асинхронного двигателя с учетом изменения его активных сопротивлений // Электротехника. – 2009. – № 11. – С. 2–12.

16. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. – 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Профессия, 2003. – 752 с.

17. Tutunji Tarek. DC Motor Identification using Impulse Response Data // Eurocon 2005. – Serbia and Montenegro, Belgrade, 2005. – P. 1734–1736.

18. Ротач В.Я. Теория автоматического управления: учебник для вузов. – М.: Изд-во МЭИ, 2005. – 400 с.

19. Шрейнер Р.Т. Системы подчиненного регулирования электроприводов: учеб. пособие. – Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2008. – 279 с.

20. Черных И.В. SIMULINK: среда создания инженерных приложений / под общ. ред. канд. техн. наук. В.Г. Потемкина. – М.: Диалог-МИФИ, 2003. – 496 с.

21. Мелешин В.И., Овчинников Д.А. Управление транзисторными преобразователями электроэнергии. – М.: Техносфера, 2011. – 576 с.

22. Оппенгейм А., Шафер Р. Цифровая обработка сигналов. – М.: Техносфера, 2006. – 856 с.

## References

1. Kopylov I.P. Elektricheskie mashiny [Electrical machines]. 2nd ed. Moscow: Vysshaya shkola: Logos, 2000. 607 p.

2. Vol'dek A.I., Popov V.V. Elektricheskie mashiny. Vvedenie v elektromekhaniku. Mashiny postoiannogo toka i transformatory [Electrical

machines. Introduction to Electromechanics. DC machines and transformers]. Saint Petersburg: Piter, 2008. 320 p.

3. James Kirtley Jr. 6.685 Electric Machines. Fall 2013. Massachusetts Institute of Technology: MIT OpenCourseWare, available at: <https://ocw.mit.edu> (accessed 24 September 2019).

4. Moskalenko V.V. Avtomatizirovannyi elektroprivod [Automated electric drive]. Moscow: Energoatomizdat, 1986. 416 p.

5. Anuchin A.S. Sistemy upravleniia elektroprivodov [Electric drive control systems]. Moscow: Moskovskii energeticheskii institut, 2015. 373 p.

6. Krivchenkov V.I., Popov S.A. Issledovanie vidov nabliudatelei dlia bezdatchikovykh sistem upravleniia elektroprivodom postoiannogo toka [Study of types of observers for sensorless control systems for DC electric drives]. *Razvitie sovremennoi nauki: teoreticheskie prikladnye aspekty*. Ed. T.M. Sigitov. Perm': IP Sigitov T.M., 2017, pp. 23-26.

7. Kalachev Iu.N. Nabliudateli sostoiianiia v vektornom elektroprivode [Vector drive status observers], available at: [http://privod.news/files/nabludateli\\_10.16\\_1.pdf](http://privod.news/files/nabludateli_10.16_1.pdf) (accessed 24 September 2019).

8. Gargaev A.N., Kashirskikh V.G. Identifikatsiia parametrov dvigatelei postoiannogo toka s pomoshch'iu poiskovykh metodov [Identification of DC motor parameters using search methods]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, no. 1(95), pp. 131-134.

9. Gargaev A.N., Kashirskikh V.G. Identifikatsiia parametrov dvigatelei postoiannogo toka s pomoshch'iu metoda roia chastits [Identification of parameters of DC motors using the particle swarm method]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2015, no. 4(110), pp. 71-75.

10. Pankratov V.V., Kucher E.S. Analiz metodov predvaritel'noi identifikatsii postoiannoi vremeni rotora asinkhronnogo dvigatel'ia v sistemakh elektroprivoda [Analysis of methods for preliminary identification of the time constant of the rotor of an induction motor in electric drive systems]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, no. 1(46), pp. 127-134.

11. Radimov I.N., Gulyi M.V., Rymsha V.V., Chan Tkhi Tkhu Khyong. Parametry ventil'nogo dvigatel'ia s postoiannymi magnitami [Permanent Magnet Valve Parameters]. *Elektrotehnika i elektromekhanika*.

Khar'kov: Natsional'nyi tekhnicheskii universitet "Khar'kovskii politekhnicheskii institute", 2008, no. 6, pp. 40-43.

12. Ovcharenko V.N. Adaptivnaia identifikatsiia parametrov v dinamicheskikh i staticheskikh sistemakh [Adaptive parameter identification in dynamical and static systems]. *Avtomatika i telemekhanika*, 2011, no. 3, pp. 113-123.

13. Solodkii E.M., Dadenkov D.A., Kostygov A.M. Parametricheskaia identifikatsiia asinkhronnogo dvigatel'na na osnove algoritma fazovoi avtopodstroiki chastoty [Parametric identification of an induction motor based on a phase-locked-loop frequency control algorithm]. *Elektrotekhnika*, 2018, no. 11, pp. 53-57.

14. Odnol'ko D.S. Sovmestnaia identifikatsiia aktivnogo soprotivleniia statora i rotora asinkhronnogo dvigatel'na na intervale shirotno-impul'snoi moduliatsii [Identifying the active stator and rotor impedances of an induction motor over the pulse-width modulation interval]. *Elektrotekhnika*, 2013, no. 5, pp. 16-20.

15. Volkov A.V., Skal'ko Iu.S. Identifikatsiia potokostsepleniia rotora i skorosti asinkhronnogo dvigatel'na s uchetom izmeneniia ego aktivnykh soprotivlenii [Identification of rotor flow connection and asynchronous motor speed taking into account variation of its active resistances]. *Elektrotekhnika*, 2009, no. 11, pp. 2-12.

16. Besekerskii V.A., Popov E.P. Teoriia sistem avtomaticheskogo upravleniia [Theory of automatic control systems]. 4nd ed. Saint Petersburg: Professii, 2003. 752 p.

17. Tutunji Tarek. DC Motor Identification using Impulse Response Data. *Eurocon 2005*. Serbia and Montenegro, Belgrade, 2005, pp. 1734-1736.

18. Rotach V.Ia. Teoriia avtomaticheskogo upravleniia [Automatic control theory]. Moscow: Moskovskii energeticheskii institut, 2005. 400 p.

19. Shreiner R.T. Sistemy podchinennogo regulirovaniia elektroprivodov [Systems of subordinate regulation of electric drives]. Ekaterinburg: Rossiiskii gosudarstvennyi professional'no-pedagogicheskii universitet, 2008. 279 p.

20. Chernykh I.V. SIMULINK: sreda sozdaniia inzhenernykh prilozhenii [SIMULINK: engineering application creation environment]. Ed. V.G. Potemkin. Moscow: Dialog-MIFI, 2003. 496 p.

21. Meleshin V.I., Ovchinnikov D.A. Upravlenie tranzistornymi preobrazovateliami elektroenergii [Transistor power converters]. Moscow: Tekhnosfera, 2011. 576 p.

22. Oppengeim A., Shafer R. Tsifrovaia obrabotka signalov [Discrete-time signal processing]. Moscow: Tekhnosfera, 2006. 856 p.

### **Сведения об авторах**

**Попов Сергей Анатольевич** (Краснодар, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электрические машины» Кубанского государственного технологического университета (350072, Краснодар, ул. Московская, 2, e-mail: sa\_popov@inbox.ru).

**Кривченков Владимир Игоревич** (Краснодар, Россия) – аспирант кафедры «Электротехника и электрические машины» Кубанского государственного технологического университета (350072, Краснодар, ул. Московская, 2, e-mail: vldmrkr5@ya.ru).

### **About the authors**

**Popov Sergey Anatolevich** (Krasnodar, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor Department of Electrical Engineering and Electric Machines Kuban State Technological University (350072, Krasnodar, 2, Moskovskaya str., e-mail: sa\_popov@inbox.ru).

**Krivchenkov Vladimir Igorevich** (Krasnodar, Russian Federation) is a Graduate Student Department of Electrical Engineering and Electric Machines, Kuban State Technological University (350072, Krasnodar, 2, Moskovskaya str., e-mail: vldmrkr5@ya.ru).

Получено 27.01.2020