

УДК 621.313.32

DOI 10.46960/2658-6754\_2021\_2\_41

## **СИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ**

**Т.Э. Муртазин**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
Нижний Новгород, Россия  
tm.murtazin@yandex.ru

**В.Г. Титов**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
Нижний Новгород, Россия  
eos@ntu.ru

Представлена структура векторного управления синхронным электродвигателем, а также инженерная методика расчета элементов системы управления. Предложена математическая имитационная модель частотно-регулируемого синхронного электропривода с векторным управлением. Приведены результаты моделирования. Изучение и разработка систем векторного управления актуальна, поскольку в настоящее время подавляющее большинство регулируемых синхронных электроприводов разрабатывается с таким типом управления. Современное программное обеспечение имитационного моделирования позволяет на этапе проектирования оценивать качество переходных процессов токов, скорости и момента электродвигателя. На основе полученных результатов имеется возможность сформировать требования к синхронным машинам, к полупроводниковым элементам силовой части и преобразователям в целом. Результаты моделирования подтверждают правильность настройки контуров регулирования и позволяют говорить о пригодности разработанной модели для инженерных расчетов.

**Ключевые слова:** векторное управление, имитационное математическое моделирование, синхронный электропривод, частотное регулирование.

**Для цитирования:** Муртазин Т.Э., Титов В.Г. Синхронный электропривод с векторным управлением // Интеллектуальная Электротехника. 2021. № 2. С. 41-52. DOI: 10.46960/2658-6754\_2021\_2\_41

## SYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE WITH VECTOR CONTROL

**T.E. Murtazin**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
Nizhny Novgorod, Russia  
tm.murtazin@yandex.ru

**V.G. Titov**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
Nizhny Novgorod, Russia  
eos@nntu.ru

**Abstract.** The study and development of vector control systems is relevant, since currently the vast majority of regulated synchronous electric drives are developed with this type of control. Modern simulation software allows you to evaluate the quality of transient processes of currents, speed and torque of the electric motor at the design stage. Based on the results obtained, it is possible to form requirements for synchronous machines, for semiconductor elements of the power part and for converters in general. The simulation results confirm the correct adjustment of the control loops and allow us to talk about the suitability of the developed model for engineering calculations.

**Keywords:** frequency control, simulation mathematical modeling, synchronous electric drive, vector control.

**For citation:** T.E. Murtazin and V.G. Titov, “Synchronous electric drive with vector control”, *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 41-52, 2021.  
DOI: 10.46960/2658-6754\_2021\_2\_41

### I. Введение

Одним из основных направлений развития синхронного электропривода является применение различных преобразователей частоты с векторным управлением для регулирования скорости вращения [1-5]. Постоянно развивающиеся инструменты моделирования, а также усовершенствованные технологии в области электропривода определяют актуальность изучаемого вопроса. Рассматривается имитационное математическое моделирование частотно-регулируемого синхронного электропривода с постоянными магнитами на роторе с векторным управлением [6]. В электроприводе с векторным управлением имеется возможность воздействовать на положение пространственного вектора тока статора относительно связанного с ротором вектора потока ротора, что позволяет задавать и регулировать электромагнитный момент машины.

## II. Описание синхронного двигателя с постоянными магнитами на роторе во вращающейся системе координат

Векторная диаграмма (рис. 1) отображает процессы в синхронном двигателе [7]. Она рассматривается в декартовой вращающейся системе координат  $dq$ , ось  $d$  которого сонаправлена с вектором потока ротора  $\vec{\Psi}_f$ .

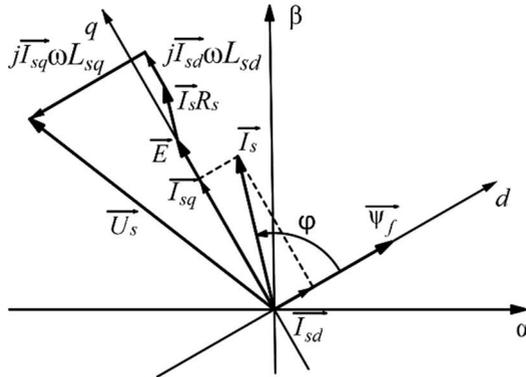


Рис. 1. Векторная диаграмма процессов в синхронном двигателе с явнополюсным ротором из постоянных магнитов  
Fig. 1. Vector diagram of processes in a synchronous motor with a single-pole rotor made of permanent magnets

Вектор  $\vec{\Psi}_f$  отстает от вектора тока статора  $\vec{I}_s$  на угол  $\varphi$ , который называется углом скручивания. Запишем основные уравнения, описывающие процессы в синхронном двигателе.

Амплитуда вектора ЭДС  $E$ , В:

$$E = \Psi_f \cdot \omega = \Psi_f \cdot Z_p \cdot \omega_R, \quad (1)$$

где  $\omega = Z_p \cdot \omega_R$  – электрическая скорость вращения, рад/с;  $Z_p$  – число пар полюсов электрической машины;  $\omega_R$  – частота вращения ротора, рад/с.

Вектор напряжения статора  $\vec{U}_S$ , В, исходя из диаграммы на рис. 1, описывается выражением:

$$\vec{U}_S = \vec{E} + \vec{I}_s \cdot R_s + j\omega(\vec{I}_{sd} \cdot L_{sd} + \vec{I}_{sq} \cdot L_{sq}), \quad (2)$$

где  $\vec{I}_s$  – вектор тока статора, А;  $\vec{I}_{sd}$  и  $\vec{I}_{sq}$  – проекции вектора тока статора на оси  $d$  и  $q$ , А;  $L_{sd}$  и  $L_{sq}$  – индуктивности статора по осям  $d$  и  $q$  соответственно, Гн;  $R_s$  – активное сопротивление статора, Ом.

Выражение модуля момента  $M$ , Н·м:

$$M = \frac{3}{2} \cdot Z_p \cdot |\vec{I}_s| \cdot |\vec{\psi}_s| \cdot \sin \varepsilon = \frac{3}{2} \cdot Z_p \cdot (I_{sq} \cdot \psi_d - I_{sd} \cdot \psi_q), \quad (3)$$

где  $\psi_d$  и  $\psi_q$  – потокоцепления статора по соответствующим осям, Вб:

$$\psi_d = L_{sd} \cdot I_{sd} + \psi_f; \quad (4)$$

$$\psi_q = L_{sq} \cdot I_{sq}. \quad (5)$$

Подставляя (4) и (5) в (3), получаем:

$$M = \frac{3}{2} \cdot Z_p \cdot |\vec{I}_s| \cdot |\vec{\psi}_s| \cdot \sin \varepsilon = \frac{3}{2} \cdot Z_p \cdot (I_{sq} \cdot \psi_f + I_{sd} \cdot I_{sq} \cdot (L_{sd} - L_{sq})). \quad (6)$$

Векторная диаграмма для синхронной машины с неявнополюсным ротором представлена на рис. 2.

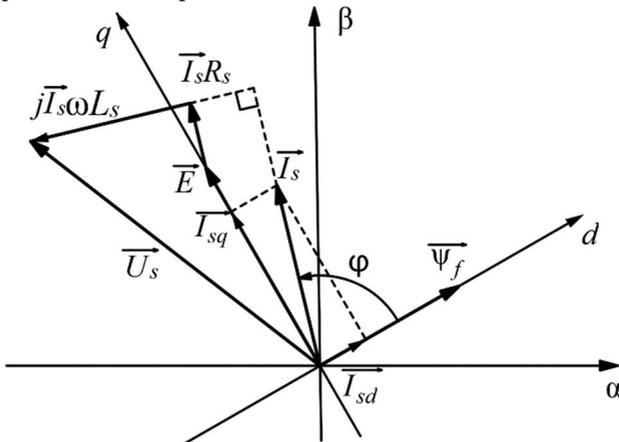


Рис. 2. Векторная диаграмма процессов в синхронном двигателе с неявнополюсным ротором

Fig. 2. Vector diagram of processes in a synchronous motor with an implicit pole rotor

Вышеперечисленные выражения также справедливы для неявнополюсной синхронной машины. Исходя из того, что  $L_{sd} = L_{sq}$ , выражение для момента упрощается:

$$M = \frac{3}{2} \cdot Z_p \cdot I_{sq} \cdot \Psi_f. \quad (7)$$

Из (7) видно, что ток  $I_{sd}$  не участвует в создании момента и является паразитным. Поэтому следует настроить систему регулирования таким образом, чтобы вектор тока статора ориентировался вдоль оси  $q$ :

$$|I_s| = I_{sq} = \frac{2 \cdot M}{3 \cdot Z_p \cdot \Psi_f}. \quad (8)$$

При этом векторная диаграмма примет следующий вид (рис. 3).

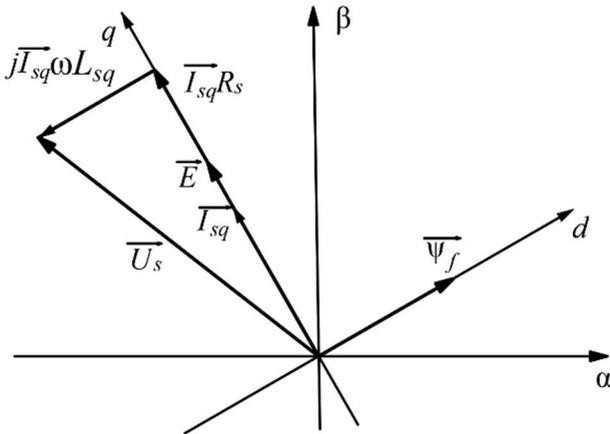


Рис. 3. Векторная диаграмма процессов в синхронном двигателе с ориентацией тока статора по оси  $q$

Fig. 3. Vector diagram of processes in a synchronous motor with a stator current oriented along the  $q$  axis

Уравнения равновесия статора в системе координат  $dq$ :

$$U_{sd} = I_{sd} \cdot R_s + \frac{d\Psi_{sd}}{dt} - \omega \cdot \Psi_{sq}; \quad (9)$$



Моделирование системы векторного управления синхронным двигателем с постоянными магнитами на роторе проведем для двигателя, параметры которого представлены в табл. 1.

Таблица 1.  
Параметры синхронного электродвигателя

Table 1.  
Synchronous motor parameters

Номинальная мощность $P$ , Вт	800
Номинальная частота питающего напряжения, Гц	125
Номинальное напряжение, В	24
Номинальный момент $M$ , Н·м	5
Номинальная скорость $n$ , об/мин	1500
Число фаз	3
Форма обратной ЭДС	синусоидальная
Тип ротора	неявнополюсный
Число пар полюсов $p$	5
Активное сопротивление фазы статора $R_s$ , Ом	0,032645
Индуктивность фазы статора $L_s$ , Гн	0,000039
Момент инерции ротора $J$ , кг·м <sup>2</sup>	0,001

Моделирование будем производить в среде *Matlab Simulink* [8, 9]. Силовая часть представлена на рис. 5.

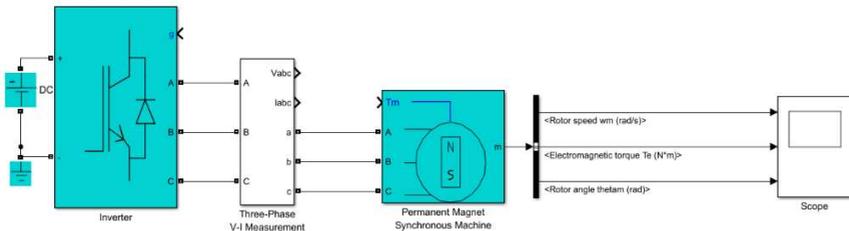


Рис. 5. Силовая часть синхронного электропривода  
Fig. 5. Synchronous electric drive power circuit

Блок «*Inverter*», построенный на базе *IGBT* транзисторов, получает питание от идеального источника постоянного напряжения «*DC*». Затем через блок измерений «*Three-Phase V-I Measurement*» инвертированное напряжение поступает на двигатель. С помощью элемента «*Bus selector*» и блока «*Scope*» будем наблюдать за сигналами скорости и момента двигателя.

Схема векторного управления (рис. 6) построена на основе структуры (рис. 4) и на основании уравнений, описанных выше.

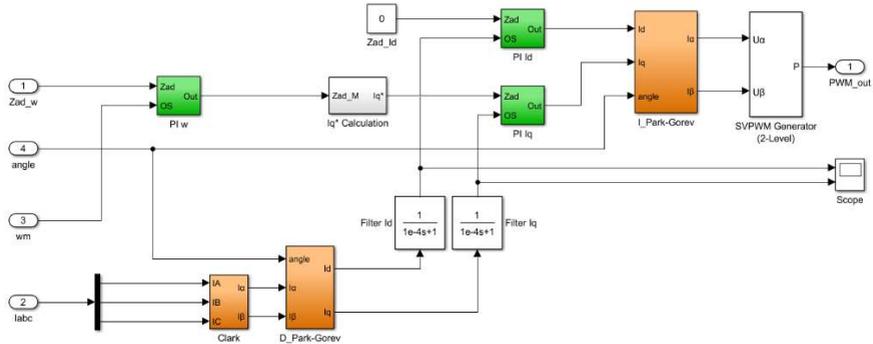


Рис. 6. Модель структуры векторного управления (блок «Control system»)

Fig. 6. Model of the vector control structure («Control system» block)

Блоки «Clark», «D\_Park-Gorev» и «I\_Park-Gorev» осуществляют координатные преобразования из трехфазной неподвижной системы в двухфазную неподвижную, из неподвижной системы во вращающуюся и из вращающейся системы координат в неподвижную соответственно. Блок «Iq\* Calculation» производит вычисление задания на ток по оси  $q$ . Блоки «Filter Id» и «Filter Iq» предназначены для фильтрации сигналов обратных связей по току оси  $d$  и  $q$  соответственно от высокочастотных искажений. Блоки «PI w», «PI Id» и «PI Iq» – ПИ-регуляторы скорости, тока  $I_d$  и тока  $I_q$  соответственно.

Система управления выдает сигналы напряжения  $U_\alpha$  и  $U_\beta$ . Для реализации данных векторов использован блок векторной ШИМ «SVPWM Generator (2-Level)», который на основе этих сигналов выдает импульсы, частотой 10 кГц, на затворы транзисторов инвертора. Блок «Scope» позволяет отобразить сигналы текущего состояния токов  $I_d$  и  $I_q$ . Система управления и регулирования построена по подчиненному принципу и имеет два внутренних параллельных контура тока и один внешний контур скорости. Если математическое выражение коэффициентов является практически невозможным для такой сложной системы, можно прибегнуть к методам подбора [10]. Воспользовавшись одним из методов подбора, определим коэффициенты пропорциональной и интегральной части ПИ-регуляторов токов и скорости. Таким образом, математическая имитационная модель системы векторного управления синхронным электроприводом полностью собрана (рис. 7). Переходные процессы токов оси  $d$  и  $q$  при настроенных методом подбора регуляторов показаны на рис. 8. Переходные процессы пуска с последующим приложением номинального момента показаны на рис. 9.

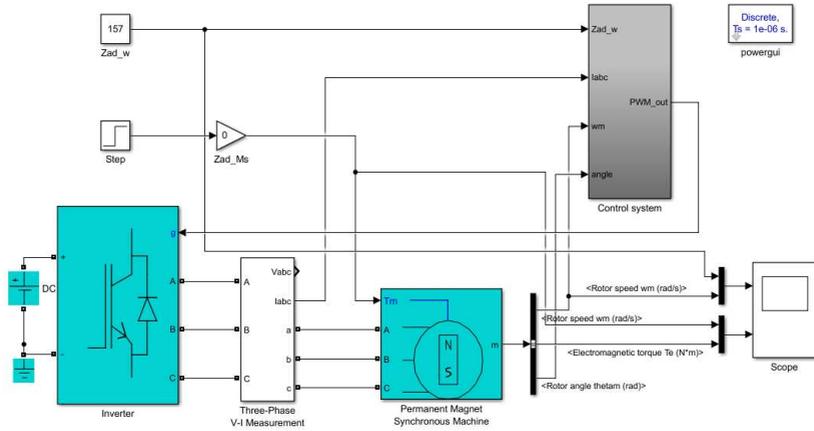


Рис. 7. Модель системы векторного управления синхронным электроприводом

Fig. 7. Model of a vector control system for a synchronous electric drive

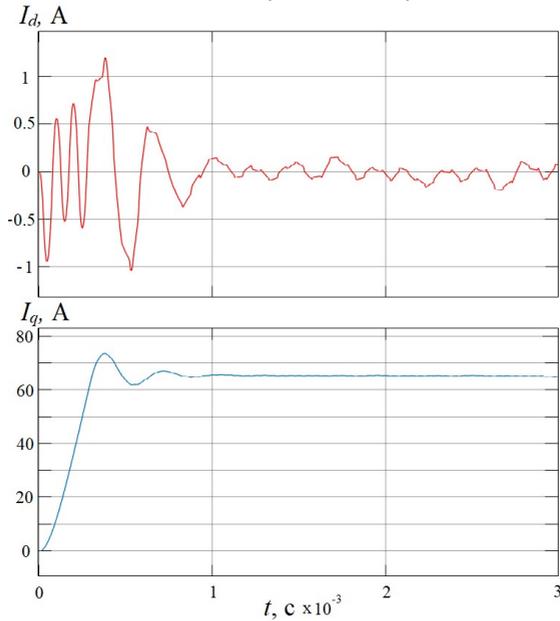


Рис. 8. Переходные процессы токов  $I_d$  и  $I_q$

Fig. 8.  $I_d$  and  $I_q$  current transients

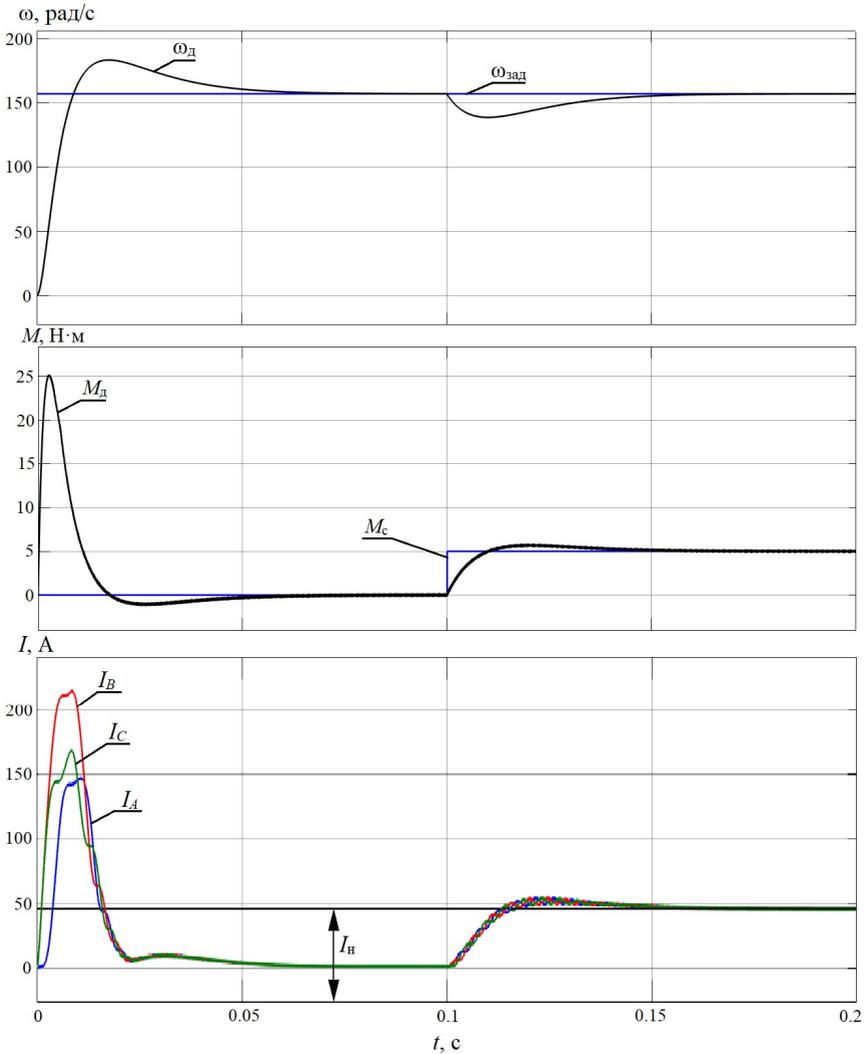


Рис. 9. Переходные процессы скорости и момента двигателя  
 $\omega_{д}$  – скорость вращения двигателя;  $\omega_{зад}$  – задание на скорость;  
 $M_{д}$  – электромагнитный момент двигателя;  $M_{с}$  – момент нагрузки;  
 $I_A, I_B, I_C$  – токи двигателя в фазах  $A, B$  и  $C$ ;  $I_n$  – номинальный ток двигателя

Fig. 9. Transients of engine speed and torque

$\omega_{д}$  – engine speed;  $\omega_{зад}$  – setting speed;  
 $M_{д}$  – electromagnetic torque;  $M_{с}$  – load torque;  
 $I_A, I_B, I_C$  – motor currents in phases  $A, B$ , and  $C$ ;  $I_n$  – rated motor current

Переходные процессы имеют хорошее быстроедействие и необходимую устойчивость. Статическая ошибка скорости при работе электродвигателя под нагрузкой отсутствует.

#### IV. Заключение

Анализ результатов моделирования показал, что предложенный вариант системы векторного управления частотно-регулируемым синхронным электроприводом с постоянными магнитами работоспособен. Методика расчета параметров системы управления применима практически для любого синхронного электропривода. Следует заметить, что структура управления для электроприводов любой мощности одинакова. Однако в приводах большой мощности часто применяются усложненные схемы инверторов, а также, для повышения энергоэффективности, управляемые выпрямители. Поэтому необходимо дополнить и усложнить систему управления. Для синхронных электродвигателей с обмоткой возбуждения на роторе также следует учесть управление возбудителями.

© Муртазин Т.Э., 2021

© Титов В.Г., 2021

Поступила в редакцию 08.06.2021

Received 08.06.2021

#### Библиографический список

- [1] Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Академия, 2006. – 265 с.
- [2] Тихомиров В.А., Титов В.Г., Хватов С.В. Технические и экономические аспекты применения регулируемых приводов постоянного и переменного тока // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2010. № 4 (83). С. 190-204.
- [3] Михеев Е.А. Частотное регулирование электропривода // Символ Науки: Международный научный журнал. 2016. № 11-3. С. 124-126.
- [4] Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов. – М.: Академия, 2005. –304 с.
- [5] Patel V., KGiri V. Field oriented control of PMSM drive using SVPWM // International Journal of Emerging Engineering Research and Technology. 2014. Т. 2. Вып. 3. С. 246-255.
- [6] Фролов В.Я., Жилиготовов Р.И. Разработка системы бездатчикового векторного управления синхронным двигателем с постоянными магнитами в Matlab Simulink // Записки Горного института. 2018. Т. 229. С. 92-97. DOI: 10.25515/PMI.2018.1.92.
- [7] Калачев Ю.Н. Векторное регулирование (заметки практика). М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – 72 с.
- [8] Дьяконов В.П. MATLAB. Полный самоучитель. М.: ДМК Пресс, 2012. – 768 с.
- [9] Дьяконов В.П. Simulink 5/6/7: Самоучитель. М.: ДМК Пресс, 2008. – 784 с.

- [10] Вадутов О.С. Настройка типовых регуляторов по методу Циглера–Никольса. Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – 10 с.

### References

- [1] G.G. Sokolovsky, *Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem [Variable frequency AC drives]*. Moscow: Academya, 2006 (in Russian).
- [2] V.A. Tikhomirov, V.G. Titov and S.V. Khvatov, “Technical and economic aspects of the using controlled drive constant and alternating current”, *Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*, no. 4 (83). pp. 190-204, 2010.
- [3] E.A. Mikheev, “Chastotnoye regulirovaniye elektroprivoda [Electric drive variable frequency control]”, *Symbol of Science: International scientific journal*, no. 11-3, pp. 124-126, 2016 (in Russian).
- [4] V.M. Terekhov and O.I. Osipov, *Sistemy upravleniya elektroprivodov [Electric drive control systems]*. Moscow: Akademiya, 2005 (in Russian).
- [5] V. Patel and V. KGiri, “Field oriented control of PMSM drive using SVPWM”, *International Journal of Emerging Engineering Research and Technology*, vol. 2, is. 3, pp. 246-255, June 2014.
- [6] V.Y. Frolov and R.I. Zhiligitov, “Development of sensorless vector control system for permanent magnet synchronous motor in Matlab Simulink”, *Journal of Mining Institute*, vol. 229, pp. 92-97, 2018 (in Russian). DOI: 10.25515/PMI.2018.1.92.
- [7] Y.N. Kalachev, *Vektornoye regulirovaniye (zametki praktika) [Vector control (practitioner's notes)]*. Moscow: MPEI, 2013 (in Russian).
- [8] V.P. Diakonov. *MATLAB. Polniy samouchitel [MATLAB. Complete tutorial]*. Moscow: DMK Press, 2012 (in Russian).
- [9] V.P. Diakonov. *Simulink 5/6/7: Samouchitel [Simulink 5/6/7: Tutorial]*. Moscow: DMK Press, 2008 (in Russian).
- [10] O.S. Vadutov, *Nastroyka tipovykh regulyatorov po metodu Tsiglera-Nikol'sa [Setting up standard regulators using the Ziegler-Nichols method]*. Tomsk: TPU, 2014 (in Russian).

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Муртазин Тимур Эмильевич**, магистрант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

**Timur E. Murtazin**, master of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

**Титов Владимир Георгиевич**, доктор технических наук, профессор, профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

**Vladimir G. Titov**, D. Sci. (Eng.), professor, professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.