

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.056

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-2-76-82

Оригинальная статья /Original Paper

Разработка компьютерной имитационной модели трехфазного асинхронного электропривода с использованием регулируемого транзисторного редуктора

С.Ю. Еремочкин, А.А. Жуков, Д.В. Дорохов

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, Россия

Резюме. Цель. Целью данной работы является исследование характеристик электропривода с использованием транзисторного редуктора асинхронного двигателя с помощью средств компьютерного имитационного моделирования. **Метод.** Исследование основано на методах имитационного моделирования. **Результат.** Определены значения угловой скорости при фиксированных значениях момента сопротивления для построения статической механической характеристики, а также значения коэффициента полезного действия и коэффициента мощности при увеличивающейся активной мощности на валу электродвигателя. Определены значения аналогичных величин для электродвигателя, питание которого осуществляется с помощью фазосдвигающего конденсатора. Определены зависимости коэффициента мощности и коэффициента полезного действия от активной мощности на валу электродвигателя. **Вывод.** Полученные в результате компьютерного имитационного моделирования данные свидетельствуют об эффективности предлагаемого транзисторного редуктора.

Ключевые слова: имитационное моделирование, компьютерное моделирование, программное обеспечение.

Для цитирования: С.Ю. Еремочкин, А.А. Жуков, Д.В. Дорохов. Разработка компьютерной имитационной модели трехфазного асинхронного электропривода с использованием регулируемого транзисторного редуктора. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(2): 76-82. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-2-76-82

Development of a computer simulation model of a three-phase asynchronous electric drive using an adjustable transistor reducer

S.Yu. Eremochkin, A.A. Zhukov, D.V. Dorokhov

I.I. Polzunova Altai State Technical University,
46 Lenin Ave., Barnaul 656038, Russia

Abstract. Objective. The purpose of this work is to study the characteristics of an electric drive using a transistor reducer of an induction motor using computer simulation tools. **Method.** The study is based on simulation methods. **Result.** The values of the angular velocity are determined at fixed values of the moment of resistance for constructing a static mechanical characteristic, as well as the values of the efficiency and power factor with increasing active power on the motor shaft. The values of similar quantities for the electric motor, which is powered by a phase-shifting capacitor, are determined. The dependences of the power factor and efficiency on the active power on the motor shaft are determined. **Conclusion.** The data obtained as a result of computer simulation testify to the effectiveness of the proposed transistor reducer.

Keywords: simulation modeling, computer modeling, software.

For citation: S.Yu. Eremochkin, A.A. Zhukov, D.V. Dorokhov. Development of a computer simulation model of a three-phase asynchronous electric drive using an adjustable transistor reducer. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50(2): 76-82. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-2-76-82

Введение. Основопологающим элементом повышения качества труда и высокой производительности в сельском хозяйстве является повсеместная механизация и автоматизация производственных процессов. В настоящее время асинхронные электрические машины занимают лидирующее положение среди используемых средств автоматизации. Это обусловлено простотой передачи электрической энергии на большие расстояния и высокой надёжностью асинхронных двигателей. При этом главным условием для использования трехфазных асинхронных машин является наличие трехфазной питающей сети, что не всегда представляется возможным [1-5]. В таком случае, предлагается использование оригинального устройства – полупроводникового редуктора, позволяющего осуществлять питание трехфазного асинхронного электродвигателя от однофазной сети переменного тока [6, 7].

Постановка задачи. Данная работа посвящена вопросу разработки устройства питания трехфазного асинхронного электродвигателя от однофазной сети переменного тока. Целью данной работы является исследование характеристик электропривода с использованием транзисторного редуктора асинхронного двигателя с помощью средств компьютерного имитационного моделирования. В статье представлено решение сопутствующих задач, а именно: построения имитационной модели трехфазного асинхронного электродвигателя с подключением к однофазной сети переменного тока с помощью транзисторного редуктора, сравнительный анализ характеристик устройства, а также их количественная и качественная оценка.

Методы исследования. В понимании имитационного моделирования существует определенная специализация его задач, поэтому, одним из наиболее важных решений, которые приходится принимать исследователям или разработчикам моделей, является выбор программного обеспечения, в котором будет создана компьютерная имитационная модель. Выбор программного обеспечения для имитационного моделирования должен удовлетворять условиям простоты и гибкости для решения поставленных задач, в противном случае, результаты моделирования будут значительно отличаться от реальности, или его проведение окажется вовсе невозможным [8 - 10].

В табл. 1 представлены направления метода имитационного моделирования и наиболее соответствующее им программное обеспечение.

Таблица 1. Направления имитационного моделирования

Table 1. Directions of simulation modeling

Направление/Destination	Программное обеспечение/ Software
Моделирование динамических систем/ Simulation of dynamic systems	MATLAB, VisSim, SimInTech,
Дискретное-событийное моделирование/ Discrete-Event Simulation	GPSS, SYMULA, Arena
Агентное моделирование/ Agent based modeling	Net Logo, Swarm, Repast, ASCAPE
Системная динамика/ System Dynamics	VenSim, PowerSim, iSink

Для решения задач имитационного моделирования в области электротехники и электропривода необходимо использовать программное обеспечение, позволяющее выполнять динамическое моделирование технических систем [11 - 13]. Как было отмечено в табл. 1, таковым программным обеспечением является разработка российской компании «SimInTech».

Программное обеспечение SimInTech предназначено для подробного исследования и анализа динамических процессов в различных объектах управления. Разработка имитационных моделей выполняется в виде построения структурных схем логико-динамических систем, которые описываются во входо-выходных отношениях в виде систем обыкновенных дифференциальных уравнений или дифференциально-алгебраических уравнений. В качестве объекта имитационного моделирования был выбран электродвигатель марки «4АА50В4У3».

Согласно справочной информации, данный электродвигатель имеет следующие паспортные данные, необходимые для создания имитационной модели в среде SimInTech:

- мощность в номинальном режиме работы $P_n = 90$ Вт;
- номинальный момент $M_n = 0,62$ Нм;
- пусковой момент $M_p = 1,25$ Нм;
- критический (максимальный момент) $M_k = 1,36$ Нм;
- сопротивление ротора $r_r = 125$ Ом;
- сопротивление статора $r_s = 77,38$ Ом;
- индуктивность главной намагничивающей цепи $L = 2,27$ Гн ;
- индуктивность обмотки ротора $L_r = 3,222$ Гн;
- индуктивность обмотки статора $L_s = 3,033$ Гн;
- число пар полюсов $Z_p = 2$ [14].

На рис. 1 представлена принципиальная электрическая схема регулируемого транзисторного редуктора трехфазного асинхронного двигателя, питающегося от однофазной сети.

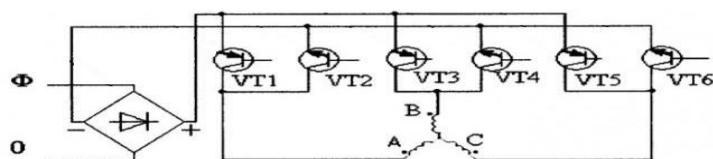


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема устройства
Fig. 1. Schematic electrical diagram of the device

Работа электродвигателя при использовании данного устройства основана на возможности создания вращающегося магнитного поля статора за счет использования векторно-алгоритмического метода управления. Базы транзисторов VT1-VT6 подключаются к системе управления, которая позволяет обеспечивать их открытие по заданному алгоритму, за счет чего происходит управление напряжением сети поступающего к каждой обмотке. Например, работа по одному из таких алгоритмов обеспечивает вращение вектора магнитной индукции кругового поля статора, подключенного к устройству, в соответствии с векторной диаграммой, изображенной на рис. 2, по часовой стрелке от вектора «I» до вектора «VI» [15].

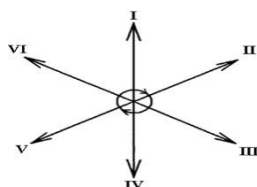


Рис. 2. Векторная диаграмма вращения вектора магнитного потока поля статора
Fig. 2. Vector diagram of the rotation of the magnetic flux vector of the stator field

Для выполнения моделирования была разработана базовая имитационная модель трехфазного асинхронного электродвигателя, которая позволяет получать характеристики исследуемого электропривода [16-18]. На рис. 3 представлена имитационная модель для прямого пуска асинхронного электродвигателя «4AA50B4Y3», созданная в среде «SimInTech».

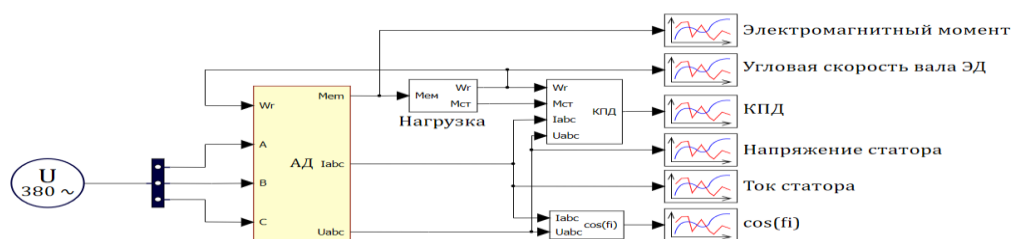


Рис. 3. Имитационная модель пуска асинхронного электродвигателя марки «4AA50B4Y3»
Fig. 3. Simulation model of starting an asynchronous electric motor of the brand "4AA50V4U3"

На рис. 4 представлена имитационная модель регулируемого транзисторного редуктора трехфазного асинхронного двигателя, питающегося от однофазной сети.

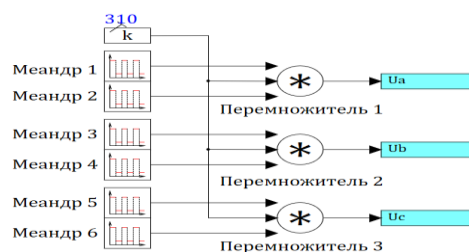


Рис. 4. Имитационная модель регулируемого транзисторного редуктора трехфазного асинхронного двигателя, питающегося от однофазной сети

Fig. 4. Simulation model of an adjustable transistor gearbox of a three-phase asynchronous motor powered by a single-phase network

На рис. 5 представлена имитационная модель, позволяющая моделировать работу трехфазного асинхронного электродвигателя с помощью регулируемого транзисторного редуктора трехфазного асинхронного двигателя.

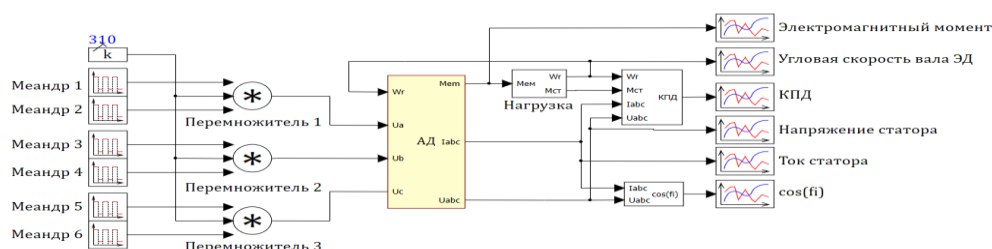


Рис. 5. Имитационная модель асинхронного электропривода при использовании регулируемого транзисторного редуктора трехфазного асинхронного двигателя

Fig. 5. Simulation model of an asynchronous electric drive using an adjustable transistor gearbox of a three-phase asynchronous motor

С помощью имитационной модели, представленной на рис. 5, были получены значения угловой скорости при фиксированных значениях момента сопротивления для построения статической механической характеристики (табл. 2), а также значения коэффициента полезного действия и коэффициента мощности при увеличивающейся активной мощности на валу электродвигателя (табл. 3) [19, 20].

Таблица 2. Точки для построения естественной статической механической характеристики

Table 2. Points for constructing a natural static mechanical characteristic

№ точки	1	2	3	4	5
M, Нм	0,62	0,67	0,62	0,4	0
ω , рад/с	0	70	98	127	151

Таблица 3. Точки для построения рабочих характеристик

Table 3. Points for building performance characteristics

№ точки	1	2	3	4	5
P_2 , Вт	0	20	40	57	60
η	0	0,15	0,31	0,45	0,42
$\cos \varphi$	0,05	0,14	0,27	0,41	0,4

Для сравнительного анализа результатов моделирования данного устройства, были получены значения аналогичных величин для электродвигателя, питание которого осуществляется с помощью фазосдвигающего конденсатора (табл. 4, табл. 5).

Таблица 4. Точки для построения естественной статической механической характеристики

Table 4. Points for constructing a natural static mechanical characteristic

№ точки	1	2	3	4	5
M, Нм	0,41	0,55	0,5	0,4	0
ω , рад/с	0	100	122	133	151

Таблица 5. Точки для построения рабочих характеристик

Table 5. Points for building performance characteristics

№ точки	1	2	3	4	5
P_2 , Вт	0	20	40	57	60
η	0	0,17	0,31	0,38	0,36
$\cos \varphi$	0,05	0,15	0,27	0,39	0,35

Обсуждение результатов. На основании значений, представленных в табл. 2 и табл. 4, были получены естественные статические механические характеристики для рассматриваемых электроприводов.

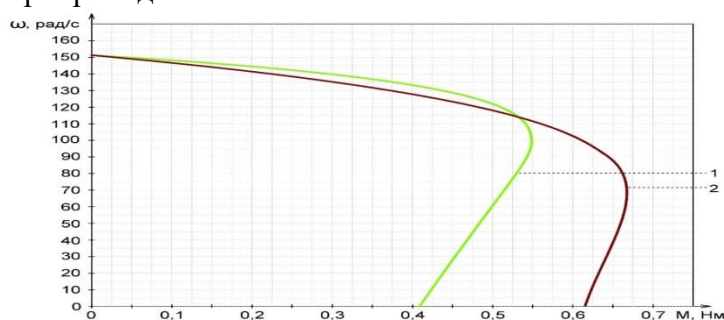


Рис. 6. Статические механические характеристики электродвигателей: 1 – при питании с помощью фазосдвигающего конденсатора; 2 – при питании с помощью транзисторного редуктора

Fig. 6. Static mechanical characteristics of electric motors: 1 – when powered by a phase-shifting capacitor; 2 – when powered by a transistor reducer

Также, на основании значений, представленных в табл. 3 и табл. 5, для рассматриваемых электроприводов были получены зависимости коэффициента мощности (рис. 7) и коэффициента полезного действия (рис. 8) от активной мощности на валу электродвигателя.

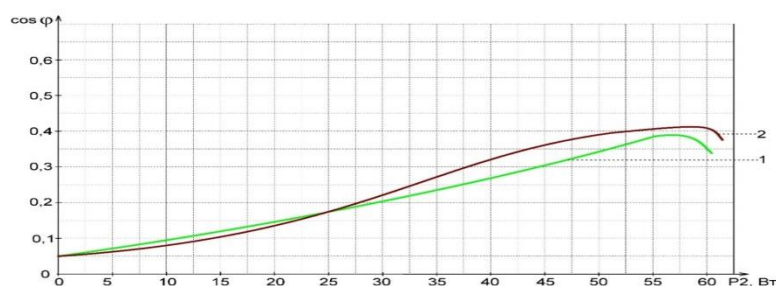


Рис. 7. Зависимость коэффициента мощности от активной мощности на валу электродвигателя: 1 – при питании с помощью фазосдвигающего конденсатора; 2 – при питании с помощью транзисторного редуктора

Fig. 7. The dependence of the power factor on the active power on the motor shaft: 1 – when powered by a phase-shifting capacitor; 2 – when powered by a transistor reducer

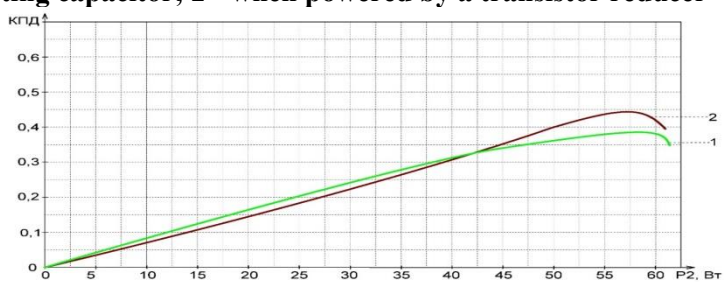


Рис. 8. Зависимость коэффициента полезного действия от активной мощности на валу электродвигателя: 1 – при питании с помощью фазосдвигающего конденсатора; 2 – при питании с помощью транзисторного редуктора

Fig. 8. The dependence of the efficiency on the active power on the motor shaft: 1 – when powered by a phase-shifting capacitor; 2 – when powered by a transistor gearbox

В результате проведенного моделирования были получены следующие результаты: при питании электродвигателя с помощью транзисторного редуктора значение пускового момента составляет 0,62 Нм, значение критического момента составляет 0,67 Нм, значение номинального момента развивается при угловой скорости вращения вала электродвигателя 98 рад/с, максимальное значение коэффициента мощности (0,41) достигается при значении активной мощности на валу равной 57 Вт, максимальное значение коэффициента полезного действия (0,45) достигается при значении активной мощности на валу равной

57 Вт. В результате сравнения установлено, что при питании электродвигателя с помощью полупроводникового редуктора, величина пускового и критического момента составляет 151% и 121% от соответствующих величин при питании электродвигателя с помощью фазосдвигающего конденсатора, а значения коэффициента мощности и коэффициента полезного действия составляют 105% и 118% от соответствующих величин при питании с помощью фазосдвигающего конденсатора.

Вывод. Полученные в результате компьютерного имитационного моделирования данные свидетельствуют об эффективности предлагаемого транзисторного редуктора. Разработанное устройство может с успехом быть использовано в электроприводе сельскохозяйственных электрифицированных машин с использованием трехфазного асинхронного двигателя при питании от однофазной сети переменного тока.

Библиографический список:

1. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием : учеб. пособие. М. : Академия, 2006. 272 с.
2. Бирюков С. Три фазы – без потери мощности // Радио. 2000. № 7. С. 37.
3. Макаров В. Г. Актуальные проблемы асинхронного электропривода и методы их решения // Вестник Казанского технологического университета. 2011. № 6. С. 79–93.
4. Макаров В. Г. Анализ современного состояния теории и практики асинхронного электропривода // Вестник Казанского технологического университета. 2011. № 6. С. 109–120.
5. Грязев М. В., Кузнецова О. А. Оптимальное управление асинхронным электроприводом // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2011. № 5. С. 212–220.
6. Халина Т. М., Стальная М. И. Исследование характеристик электропривода с преобразователем векторно-алгоритмического типа // Электротехника. 2018. № 12. С. 48–52.
7. Халина Т.М., Стальная М.И. К вопросу об эффективном использовании мобильных машин в АПК / Достижения науки и техники АПК. 2017. № 31 с. 76-80.
8. Цвенгер И. Г. Сравнительный анализ программных средств моделирования электромеханических процессов в электроприводе // Вестник Казанского технологического университета. 2014. № 12. С. 246–251.
9. Омельченко Е. Я., Харламов А. В. Моделирование на ЭВМ переходных процессов в асинхронном электроприводе // Электротехнические системы и комплексы. Магнитогорск. 1998. С. 36–42.
10. Куприяшкин А.Г. Основы моделирования систем : учеб. пособие. Норильск : НИИ, 2015. 135 с.
11. Шрейнер Р. Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты // Вестник УРО РАН. 2000. С. 254.
12. Козярук А. Е. Современное и перспективное алгоритмическое обеспечение частотно-регулируемых электроприводов // Санкт-Петербургская электротехническая компания. 2004. С. 127.
13. Денисов В. А., Третьякова М. Н., Бородин О. А. Математическое моделирование асинхронных электроприводов с векторным управлением // Электротехнические комплексы и системы. 2016. № 1. С. 5–11.
14. Кацман М.М. Электрические машины : учеб. пособие. М : Академия, 2013. 496 с.
15. Пат. 2402864 Российская федерация, МПК H02P 1/42, H02P 1/26, H02M 5/27. Регулируемый транзисторный редуктор трехфазного асинхронного двигателя, питающегося от однофазной сети / М. И. Стальная, А. П. Борисов, П. С. Черемисин, А. С. Фомин ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». № 2009129723/07 ; заявл. . 03.08.2009; опубл. 27.10.2010, Бюл. № 30.
16. Даниленко А. Ф., Змиевской В. А. Управление асинхронным электроприводом // Вестник Национального технического университета Харьковского политехнический институт. Серия: Информатика и моделирование. 2005. С. 48–51.
17. Акопов А.С. Имитационное моделирование : учеб. пособие. Люберцы : Юрайт, 2016. 389 с.
18. Библиотеки блоков [Электронный ресурс] // Справочная система SimInTech. URL: https://help.simintech.ru/#o_simintech/browsers.html / (дата обращения: 01.11.2022).
19. Khalina T.M., Eremochkin S. Yu., Dorokhov D. V. The development of an energy efficient electric drive for agricultural machines IX International Scientific and Practical Conference: Energy and Resource Saving XXI Century (ERS 2021), 10-12 November 2021. DOI: 10.1088/1757-899X/1211/1/012018.
20. Eremochkin, Sergey, Dorokhov Danil. Characteristics Research of the Semiconductor Frequency Converter in Matlab Simulink / XV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE), 19-21 November 2021. DOI: 10.1109/APEIE52976.2021.9647561.

References:

1. Sokolovsky G.G. Alternating current electric drives with frequency control : textbook. manual. Academy; 2006; 272. (In Russ)

2. Biryukov S. Three phases – without loss of power . Radio. 2000; 7; 37. (In Russ)
3. Makarov V. G. Actual problems of asynchronous electric drive and methods of their solution. *Bulletin of Kazan Technological University*. 2011; 6; 79-93. (In Russ)
4. Makarov V. G. Analysis of the current state of the theory and practice of asynchronous electric drive. *Bulletin of Kazan Technological University*. 2011; 6; 109-120. (In Russ)
5. Gryazev M. V., Kuznetsova O. A. Optimal control of asynchronous electric drive. *Izvestiya Tula State University. Technical Sciences*. 2011; 5; 212-220. (In Russ)
6. Khalina T. M., Stalnaya M. I. Investigation of the characteristics of an electric drive with a vector-algorithmic type converter. *Electrical Engineering*. 2018; 12; 48-52. (In Russ)
7. Halina T.M., Stalnaya M.I. On the question of the effective use of mobile machines in the agro-industrial complex. *Achievements of science and technology of the agro-industrial complex*. 2017; 31; 76-80. (In Russ)
8. Tsvenger I. G. Comparative analysis of software tools for modeling electromechanical processes in an electric drive. *Bulletin of Kazan Technological University*. 2014; 12; 246-251. (In Russ)
9. Omelchenko E. Ya., Kharlamov A.V. Computer simulation of transients in asynchronous electric drive. *Electrotechnical systems and complexes. Magnitogorsk*. 1998; 36-42. (In Russ)
10. Kupriyashkin A.G. Fundamentals of systems modeling : textbook. stipend. *Norilsk. Research Institute*; 2015; 135. (In Russ)
11. Schreiner R. T. Mathematical modeling of AC electric drives with semiconductor frequency converters *Bulletin of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2000; 254. (In Russ)
12. Kozyaruk A. E. Modern and promising algorithmic support of frequency-controlled electric drives . St. Petersburg Electrotechnical Company. 2004; 127. (In Russ)
13. Denisov V. A., Tretyakova M. N., Borodin O. A. Mathematical modeling of asynchronous electric drives with vector control. *Electrotechnical complexes and systems*. 2016; 1; 5-11. (In Russ)
14. Katsman M.M. Electric machines : textbook. stipend. Moscow. Academy; 2013; 496. (In Russ)
15. Pat. 2402864 Russian Federation, IPC N02R 1/42, N02R 1/26, N02M 5/27. Adjustable transistor reducer of a three-phase asynchronous motor powered by a single-phase network / M. I. Stalnaya, A. P. Borisov, P. S. Cheremisin, A. S. Fomin; applicant and patent holder of the Altai State Technical University named after I.I. Polzunov. No. 2009129723/07 ; application. 03.08.2009; publ. 27.10.2010; (30). (In Russ)
16. Danilenko A. F., Zmievskey V. A. Asynchronous electric drive control. *Bulletin of the National Technical University of Kharkiv Polytechnic Institute. Series: Computer Science and Modeling*; 2005; 48-51. (In Russ)
17. Akopov A.S. Simulation modeling : textbook. stipend. Lyubertsy. Yurait; 2016; 389. (In Russ)
18. Block libraries [Electronic resource] SimInTech reference system. URL: https://help.simintech.ru/#o_simintech/browsers.html / (accessed: 01.11.2022). (In Russ)
19. Halina T.M., Eremochkin S. Yu., Dorokhov D. V. Development of an energy-efficient electric drive for agricultural machines IX International Scientific and Practical Conference: Energy and Resource conservation XXI century (ERS 2021), November 10-12, 2021 DOI: 10.1088/1757-899X/1211/1/012018. (In Russ)
20. Eremochkin Sergey, Dorokhov Danil. Investigation of the characteristics of a semiconductor frequency converter in Matlab Simulink / XV International Scientific and Technical Conference on Current Problems of Electronic Instrumentation (APEIE), November 19-21, 2021. DOI: 10.1109/APEIE52976.2021.9647561. (In Russ)

Сведения об авторах:

Еремочкин Сергей Юрьевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Электротехника и автоматизированный электропривод», S.Eremochkin@yandex.ru; ORCID: 0000-0001-6753-8305

Жуков Алексей Андреевич, магистрант, кафедра «Электротехника и автоматизированный электропривод»; zh_astu@mail.ru; ORCID: 0000-0003-3098-8905

Дорохов Данил Валерьевич, магистрант, кафедра «Электротехника и автоматизированный электропривод»; danil.dorokhov.2000@mail.ru; ORCID: 0000-0001-6564-5879

Information about authors:

Sergey Yu. Eremochkin, Cand.Sci.(Eng), Assoc. Prof., Department of Electrical Engineering and Automated Electric Drive, S.Eremochkin@yandex.ru; ORCID: 0000-0001-6753-8305

Aleksey A. Zhukov, Undergraduate, Department of Electrical Engineering and Automated Electric Drive; zh_astu@mail.ru; ORCID: 0000-0003-3098-8905

Danil V. Dorokhov, Undergraduate, Department of Electrical Engineering and Automated Electric Drive; danil.dorokhov.2000@mail.ru; ORCID: 0000-0001-6564-5879

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 18.03.2023.

Одобрена после рецензирования/ Revised 20.04.2023.

Принята в печать/Accepted for publication 20.04.2023.