

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ МОДЕЛЕЙ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ МАШИНЫ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ

Г.М. Тутаев, tutaevgm@mail.ru

Е.С. Безбородов, egor.bez-off@yandex.ru

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарёва, Саранск, Россия

Аннотация. При разработке и эксплуатации регулируемого электропривода важное значение имеет обеспечение температурных режимов базовой электрической машины, являющихся основными факторами надежности функционирования всей системы в целом. Выбранные на этапе проектирования алгоритмы энергоэффективного управления приводом и стратегия ШИМ в выходном инверторном звене преобразователя частоты оказывают влияние на нагрев фазных обмоток двигателя и его элементов. Для оценки этого влияния необходимы адекватные тепловые модели, топология и подбор параметров, что является сложной задачей и зависит от целого ряда факторов, таких как электрические параметры двигателя, диапазон рабочих скоростей и нагрузок, конструктивные особенности электрической машины. В статье рассматриваются достоинства и недостатки различных математических моделей теплового состояния асинхронного двигателя. Дана оценка возможности применения подобных моделей для анализа теплового состояния машины двойного питания при реализации энергоэффективных алгоритмов управления в широком диапазоне скоростей и нагрузок на валу.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, машина двойного питания, тепловая модель, преобразователь частоты, электропривод

Для цитирования: Тутаев Г.М., Безбородов Е.С. Анализ возможности применения тепловых моделей асинхронных двигателей для оценки теплового состояния машины двойного питания // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2023. Т. 23, № 4. С. 47–53. DOI: 10.14529/power230405

Original article
DOI: 10.14529/power230405

AN ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF APPLYING THERMAL MODELS OF ASYNCHRONOUS MOTORS TO ASSESS THE THERMAL STATE OF A DOUBLY FED MACHINE

G.M. Tutaev, tutaevgm@mail.ru

E.S. Bezborodov, egor.bez-off@yandex.ru

National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

Abstract. In the development and operation of an adjustable electric drive, it is important to ensure the optimal temperature of the base electric machine, which is the main factor in the reliability of the system as a whole. Energy-efficient drive control algorithms selected at the design stage and the PWM strategy in the output inverter section of the frequency converter affect the heating of the phase windings of the motor and its elements. To assess this effect, thermal models are needed. Selecting the topology and parameters of the model is a difficult task and depends on the electrical parameters of the engine, the range of operating speeds and loads, and the design features of the electric machine etc. This article discusses the advantages and disadvantages of mathematical models of the thermal state of an induction motor. An assessment is made of the possibility of using such models to analyze the thermal state of a doubly fed machine when implementing energy-efficient control algorithms at a wide range of speeds and shaft loads.

Keywords: asynchronous motor, dual-fed machine, thermal model, frequency converter, electric drive

For citation: Tutaev G.M., Bezborodov E.S. An analysis of the possibility of applying thermal models of asynchronous motors to assess the thermal state of a doubly fed machine. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2023;23(4):47–53. (In Russ.) DOI: 10.14529/power230405

частью машины; $\lambda_{11} = \lambda_{10} + \lambda_{12}$, $\lambda_{22} = \lambda_{20} + \lambda_{12}$, λ_{10} и λ_{20} – тепловые проводимости от узлов модели к охлаждающей среде.

Отличие в моделях [4] и [5] состоит в том, что первая позволяет оценивать состояние машины в стационарном режиме, а вторая – в динамическом. Более подробное описание моделей можно посмотреть в [4] и [5] соответственно. Применение таких моделей для оценки теплового состояния МДП затруднительно ввиду особенностей ее системы управления. Упрощённое описание цепи ротора не позволит произвести оценку теплового состояния с приемлемой точностью.

В [6] представлена трёхмассовая модель АД закрытого типа. В данной модели и аналогичных ей при описании двигателя отдаётся предпочтение статору. Статор представлен двумя телами – обмотка, сталь статора и станина. Ротор представлен однородным телом. Математическое описание модели, как и вышеописанных, производится на основе уравнения теплового баланса. Потери в цепи ротора оцениваются при условии отсутствия потерь в стали. Подробное описание представлено в [6]. Подобные модели позволяют получить более точные значения температур в части статора. Использование для оценки теплового состояния МДП возможно, однако погрешность расчётов для роторной цепи будет выше, чем для статорной.

Преобразование модели в четырёхмассовую путём дробления роторной части позволит увеличить точность расчётов температур цепи ротора, однако для этого требуется большее количество данных, чем для двухмассовых. В [7–9] представлены термодинамические модели АД закрытого типа. Каждая масса в модели [7] описывается как однородное тело со своей теплоёмкостью и бесконечно большой внутренней теплопроводностью с равномерным распределением температуры по всему объёму. Описание статора и ротора осуществляется с разбиением их на обмотку и магнито-

провод. Также в модели учтены особенности конструкции АД закрытого типа. Отличительной особенностью данной модели является использование схемы тепловых потоков, показанной на рис. 2 [7], вместо эквивалентной тепловой схемы. Математическое описание также осуществляется на основе уравнения теплового баланса. Подробное описание модели приведено в [7]. Данную модель можно использовать для оценки теплового состояния как в режиме работы двигателя S1, так и S3. Применение для оценки состояния МДП в соответствующих режимах возможно.

Модель, предлагаемая в [8], представляет массы как обмотка статора, сердечник статора, ротор, внутренний вентиляционный воздух. Модель может использоваться для оценки теплового состояния двигателя при режиме работы S2. Математическое описание электродвигателя осуществляется через уравнение Лагранжа. Описание ротора ограничено одним телом, что не позволяет определить тепловое состояние составных частей его цепи. Недостаток аналогичен модели, представленной в [6]. Применение данной модели для оценки состояния МДП возможно только при её преобразовании в пятимассовую путём разбиения ротора на части.

Анализ модели и её описания из [9] показал, что ротор и статор в ней представлены однородными телами, без разбиения. Структурная схема тепловых процессов двигателя и тепловая схема замещения показаны на рис. 3 и 4 соответственно. Математическое описание модели производится на основе уравнения теплового баланса. Расчёт тепловых параметров модели осуществляется через представление двигателя как системы цилиндрических тел. Более подробное описание модели приводится в [9]. Отличительной особенностью данной модели является варьируемый адаптивный коэффициент, который нивелирует погрешность расчётов. Компенсация погрешности осуществля-

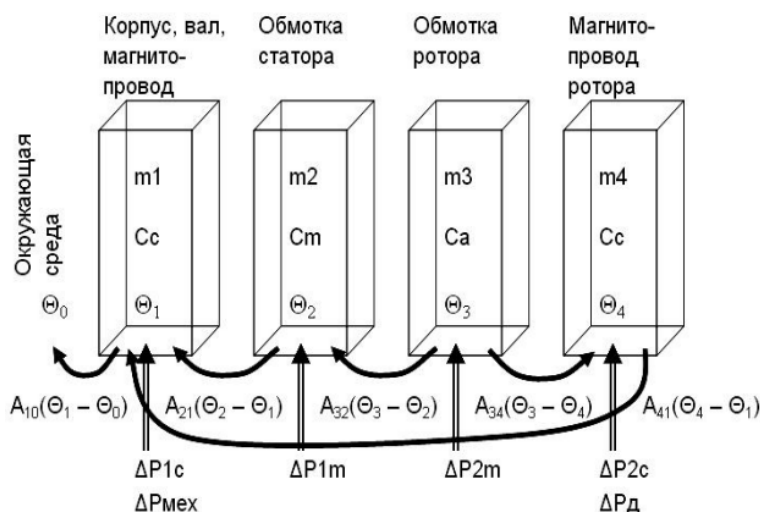


Рис. 2. Схема тепловых потоков АД закрытого типа
Fig. 2. Scheme of heat flows of a closed-type AM

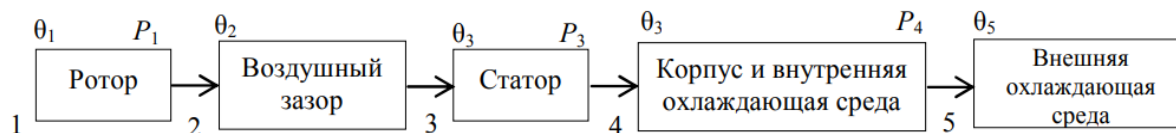


Рис. 3. Структурная схема тепловых процессов двигателя
Fig. 3. Structural diagram of the thermal processes of the engine

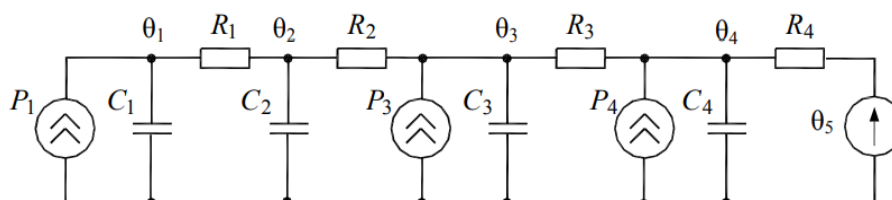


Рис. 4. Тепловая схема замещения АД
Fig. 4. Thermal equivalent circuit of an AM

ется путём косвенного расчёта адаптивного коэффициента при непосредственно измеряемых величинах: фазных напряжениях и линейных токах статора двигателя в каждой фазе, температуре поверхности корпуса, температуре внешней охлаждающей среды [9]. На каждом интервале расчёта коэффициент умножается на все виды потерь с последующим расчетом температур статора и ротора. Для проведения анализа МДП данная модель может не подойти, так как она рассчитана на применение в системах диагностики и защиты. Введенный коэффициент требует снятия реальных значений температур, а исходная модель без него имеет высокую погрешность.

Пятимассовая модель, представленная в [10], описывает статор тремя телами, а ротор одним одномерным телом. Исходя из описания модели, её построение велось преимущественно для оценки теплового состояния цепи статора. Недостаток аналогичен [8] и [6]. Такая же ситуация и с шестимассовой моделью, представленной в [11], в которой статор представлен тремя телами, ротор – одним. Недостаточное описание цепи ротора не позволит с необходимой точностью оценить тепловое состояние МДП. Преобразование моделей как с заменой некоторых масс, так и с их увеличением позволит повысить точность расчётов температуры в цепи ротора. Это даст более адекватную оценку теплового состояния МДП, но приведет к сложности расчётов и увеличит время работы модели.

Для оценки теплового состояния АД в [12] предлагается использовать комбинированную модель на базе десятимассовой тепловой схемы замещения и представляет собой две независимые модели. Расчёт температур ведётся в радиальном и осевом направлениях с рядом допущений. Цепь статора описывается четырьмя одномерными телами – обмотка, магнитопровод, пазы. Ротор описывается двумя одномерными телами – обмотка, магнитопровод. Эта модель служит основой для тепловой модели, рассмотренной в [13]. Однако

такая концепция построения моделей не позволяет оценить тепловое состояние ротора в той же степени, что и статора. Это приведёт к снижению общей точности оценки теплового состояния МДП. Но преобразования, связанные с разбиением и уточнением модели роторной цепи, позволят устранить данный недостаток.

На базе [12] построена ещё одна модель [14], в которой учтены потери в роторе и сопротивление внутреннего воздуха. Таким образом, ротор описывается тремя телами. Но как показывают результаты эксперимента, и утверждается самими авторами [14], погрешность расчётов для цепи ротора имеет высокие значения. Увеличение числа тел для описания ротора не привело к снижению погрешности. Это связано со сложностью снятия геометрических параметров ротора. Сравнительно малое и упрощённое описание цепи ротора не позволяет произвести адекватную оценку теплового состояния МДП. Модернизация модели, связанная с уточнением описания цепи ротора, позволит применить данную модель для оценки состояния МДП.

Тепловая модель АД, представленная в [15], описывает двигатель шестнадцатью телами и позволяет провести оценку теплового состояния в стационарных режимах. Для нестационарных режимов данная модель была модифицирована в [16]. Статор описывается шестью телами – пазы сердечника, изоляция «дна» пазов, спинки сердечника, пазовая часть обмотки, лобовые части обмотки. Ротор описывается двумя телами – обмотка и пазы сердечника, спинка сердечника. Недостаток аналогичен моделям из [12] и [13].

В моделях, представленных в [17–19], используют метод конечно-элементного анализа (МКЭ). Построение таких моделей и инструменты их анализа ограничиваются функционалом программной среды, вычислительными ресурсами и исходными данными о двигателе. Для построения модели [17] использовалась программная среда ELCUT. Модель представлена в двухмерном разрезе, для простоты и ускорения хода моделирования. Погреш-

ность расчётов составила 9–11 %. Модели [18, 19] построены в среде ANSYS и представлены как в двухмерном разрезе, так и в трёхмерном варианте. Погрешность модели [18] составила 2,2–3,5 %, для [19] она не приведена.

Точность тепловых моделей с использованием МКЭ определяется точностью и правильностью используемых параметров геометрии, намоток, системы охлаждения, материалов и т. д. Использование таких моделей для анализа теплового состояния МДП возможно, но появляется сильная зависимость от наличия проектной и/или конструкторской документации независимо от используемой программной среды.

Вывод

Основываясь на результатах анализа представленных тепловых моделей АД на базе эквивалентных тепловых схем замещения, можно сделать вывод, что их использование для оценки теплового состояния МДП, несмотря на теоретические обоснования, весьма затруднительно. Основная про-

блема заключается в упрощённом и/или недостаточном описании тепловой цепи ротора. Это связано со сложностью получения данных о геометрии самого ротора и температур его составных частей в ходе эксперимента, необходимых для построения модели. Однако большинство существующих моделей могут выступать в качестве базы для создания тепловой модели МДП.

Кроме того, можно заметить следующее: увеличение числа тел в модели приводит к нелинейному увеличению точности оценки температуры. Оптимальными по соотношению трудозатрат, времени моделирования и точности результатов остаются четырёх- и пятимассовые модели.

Использование моделей на основе МКЭ предпочтительней, так как они позволяют оценить в полной мере распределение тепла в двигателе. Однако для построения таких моделей может потребоваться значительно больше данных. Полученная точность расчётов модели может не соответствовать трудозатратам на её разработку и времени моделирования.

Список литературы

1. Jiang X., Zhang F., Xu X. Temperature field calculation and experimental research on brushless doubly fed machine with hybrid rotor // *2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*. Harbin, China, 2017. P. 1–6. DOI: 10.1109/ITEC-AP.2017.8080969
2. Rotor Temperature Estimation in Doubly-Fed Induction Machines Using Rotating High-Frequency Signal Injection / D.D. Reigosa, J.M. Guerrero, A.B. Diez, F. Briz // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2017. Vol. 53, no. 4. P. 3652–3662. DOI: 10.1109/TIA.2017.2684742
3. Анучин А.С., Федорова К.Г. Двухмассовая тепловая модель асинхронного двигателя // *Электротехника*. 2014. № 2. С. 21–24.
4. Метельков В.П. О расчёте параметров двухмассовой термодинамической модели асинхронного двигателя // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. 2016. Т. 16, №1. С. 58–65. DOI: 10.14529/power160109
5. Зюзев А.М., Метельков В.П. Двухканальная термодинамическая модель асинхронного двигателя для систем тепловой защиты // *Электротехнические системы и комплексы*. 2018. № 2 (39). С. 4–11. DOI: 10.18503/2311-8318-2018-2(39)-4-11
6. Петушков М.Ю. Тепловая модель асинхронного двигателя // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2011. № 4. С. 48–50.
7. Омельченко Е.Я., Агапитов Е.Б., Моисеев В.О. Термодинамическая математическая модель асинхронного двигателя // *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. 2012. № 1. С. 67–70.
8. Таранов Д.М., Лыткин А.В., Каун О.Ю. Четырёхмассовая тепловая модель электропривода // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ)*. 2014. № 104. С. 2026–2036.
9. Зализный Д.И., Широков О.Г., Попиев В.В. Адаптивная математическая модель тепловых процессов асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором // *Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого*. 2015. № 1 (60). С. 31–43.
10. Тепловая модель асинхронного двигателя для целей релейной защиты / А.В. Булычев, Е.Ю. Ерохин, Н.Д. Поздеев, О.А. Филичев // *Электротехника*. 2011. № 3. С. 26–30.
11. Ершов М.С., Феоктистов Е.А. Аналитическое решение для шестимассовой термодинамической модели асинхронного двигателя закрытого исполнения // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2022. Т. 333, № 2. С. 53–61. EDN GOUDNA. DOI: 10.18799/24131830/2022/2/3331
12. Popova L. Combined electromagnetic and thermal design platform for totally enclosed induction machines. Lappeenranta: Lappeenranta university of technology, 2010. 76 p.
13. Воробьев В.И., Пугачёв А.А., Бондаренко Д.А. Математическая модель установившихся тепловых процессов в асинхронном двигателе // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2015. № 5-2 (313). С. 221–226.

14. Валиуллин К.Р., Тушев С.И. Математическая модель нагрева асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором на основе эквивалентной тепловой схемы // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2022. Т. 22, № 4. С. 67–76. DOI: 10.14529/power220408
15. Осташевский Н.А., Петренко А.Н. Математическая модель теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя в стационарных режимах // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. Тематич. вып. науч.-техн. журн. 2009. С. 266.
16. Осташевский Н.А., Шайда В.П., Петренко А.Н. Математическая модель теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя в нестационарных режимах // Электротехнические и компьютерные системы. 2010. № 75. С. 46–51.
17. Глухов Д.М., Муравлева О.О. Моделирование работы многофазных асинхронных двигателей в аварийных режимах эксплуатации. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-raboty-mnogofaznyh-asinhronnyh-dvigatelay-v-avariynyh-rezhimah-ekspluatatsii> (дата обращения: 06.10.2023).
18. Verification of the Thermal Model of an Asynchronous Traction Motor / V. Vavilov, A. Zhrebtskov, O. Yushkova et al. // 2021 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS). Ufa, Russian Federation, 2021. P. 145–149. DOI: 10.1109/ICOECS52783.2021.9657382
19. Asynchronous Motor Modeling and Dynamic Co-Simulation Based on ANSYS / Z. Wang, L. Tao, J. Mei, W. He // Proceedings of the 2018 7th International Conference on Energy, Environment and Sustainable Development (ICEESD 2018). 2018. P. 103–108. DOI: 10.2991/iceesd-18.2018.15

References

1. Jiang X., Zhang F., Xu X. Temperature field calculation and experimental research on brushless doubly fed machine with hybrid rotor. *2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*. Harbin, China; 2017. P. 1–6. DOI: 10.1109/ITEC-AP.2017.8080969
2. Reigosa D.D., Guerrero J.M., Diez A.B., Briz F. Rotor Temperature Estimation in Doubly-Fed Induction Machines Using Rotating High-Frequency Signal Injection. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2017;53(4):3652–3662. DOI: 10.1109/TIA.2017.2684742
3. Anuchin A.S., Fedorova K.G. A two-mass thermal model of the induction motor. *Russian Electrical Engineering*. 2014;85(2):83–86. DOI: 10.3103/S1068371214020035
4. Metelkov V.P. About Calculation of Parameters of Two-Mass Thermodynamic Model of Induction Motor. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2016;16(1):58–65. (In Russ.) DOI: 10.14529/power160109
5. Ziuzev A.M., Metelkov V.P. Two-Channel Thermodynamic Model of the Induction Motor for the Heat Protection System. *Electrotechnical Systems and Complexes*. 2018;2(39):4–11. (In Russ.) DOI:10.18503/2311-8318-2018-2(39)-4-11
6. Petushkov M.Yu. [Thermal model of asynchronous motor]. *University News. North-Caucasian region. Technical sciences = Izvestiya Vuzov. Severo-Kavkazskii region. Technical science*. 2011;4:48–50. (In Russ.)
7. Omelchenko E.Ya., Agapitov E.B., Moiseev V.O. [Thermodynamic model of induction motor]. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk state technical university*. 2012;1:67–70 (In Russ.)
8. Tarnov D.M., Lytkin A.V., Kaun O.Yu. Four massive thermal model of electric drive. *Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University (Scientific Journal of KubSAU)*. 2014;104:2026–2036. (In Russ.)
9. Zaliznyy D.I., Shirokov O.G., Popichev V.V. [Adaptive mathematical model of thermal processes of an asynchronous motor with a squirrel-cage rotor]. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P.O. Sukhogo*. 2015;1(60):31–43. (In Russ.)
10. Bulychiev A.V., Erokhin E.Yu., Pozdeev N.D., Filichev O.A. Thermal model of an asynchronous motor for relay protection purposes. *Electrical Engineering*. 2011;3:26–30. (In Russ.)
11. Ershov M.S., Feoktistov E.A. Analytical solution for a six-mass thermodynamic model of a TEFC induction motor. *Bulletin of the Tomsk polytechnic university. Geo assets engineering*. 2022;333(2):53–61. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2022/2/3331
12. Popova L. *Combined electromagnetic and thermal design platform for totally enclosed induction machines*. Lappeenranta: Lappeenranta university of technology; 2010. 76 p.
13. Vorobyev V.I., Pugachev A.A., Bondarenko D.A. [Mathematical model of the steady thermal processes in asynchronous motors]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*. 2015;5-2(313):221–226. (In Russ.)
14. Valiullin K.R., Tushev S.I. Mathematical model of heating an asynchronous motor with a squirrel-cage rotor based on an equivalent thermal circuit. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2022;22(4):67–76. (In Russ.) DOI: 10.14529/power220408
15. Ostashevskiy N.A., Petrenko A. N. [Mathematical model of the thermal state of a frequency-controlled asynchronous motor in stationary modes]. In: *Problemy avtomatizirovannogo elektroprivoda. Teoriya i praktika. Tematicheskii vypusk nauchno-tekhnicheskogo zhurnala*. 2009. P. 266. (In Russ.)

16. Ostashevskiy N.A., Shayda V.P., Petrenko A.N. [Mathematical model of the thermal state of a frequency-controlled asynchronous motor in non-stationary modes]. *Elektrotekhnicheskie i komp'yuternye sistemy*. 2010;75:46–51. (In Russ.)
17. Glukhov D.M., Muravleva O.O. *Modelirovanie raboty mnogofaznykh asinkhronnykh dvigateley v avariynnykh rezhimakh ekspluatatsii* [Modeling of Multiphase Induction Motors in the Emergency Mode of Operation]. (In Russ.) Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-raboty-mnogofaznyh-asinhronnyh-dvigatelay-v-avariynnyh-rezhimah-ekspluatatsii> (accessed 06.10.2023).
18. Vavilov V., Zhrebtsov A., Yushkova O. et al. Verification of the Thermal Model of an Asynchronous Traction Motor. In: *2021 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)*. Ufa, Russian Federation; 2021. P. 145–149. DOI: 10.1109/ICOECS52783.2021.9657382
19. Wang Z., Tao L., Mei J., He W. Asynchronous Motor Modeling and Dynamic Co-Simulation Based on ANSYS. In: *Proceedings of the 2018 7th International Conference on Energy, Environment and Sustainable Development (ICEESD 2018)*; 2018. P. 103–108. DOI: 10.2991/iceesd-18.2018.15

Информация об авторах

Тутаев Геннадий Михайлович, д-р техн. наук, заведующий кафедрой электроники и электротехники, Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск, Россия; tutaevgm@mail.ru.

Безбородов Егор Сергеевич, аспирант кафедры электроники и электротехники, Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск, Россия; egor.bez-off@yandex.ru.

Information about the authors

Gennady M. Tutaev, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department of Electronics and Electrical Engineering, National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia; tutaevgm@mail.ru.

Egor S. Bezborodov, Postgraduate Student of the Department of Electronics and Electrical Engineering, National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia; egor.bez-off@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 04.09.2023; одобрена после рецензирования 25.09.2023; принята к публикации 12.10.2023.

The article was submitted 04.09.2023; approved after review 25.09.2023; accepted for publication 12.10.2023.