

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.313.33

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-4-85-90



Моделирование потерь энергии в асинхронном электродвигателе

Оськин Сергей Владимирович✉, *д-р техн. наук, профессор*¹
kgauem@yandex.ru✉

Мирошников Алексей Владимирович, *аспирант*¹
el-mash@kubsau.ru

Нагучев Заур Хамедович, *аспирант*¹
el-mash@kubsau.ru

Украинцев Максим Михайлович, *канд. техн. наук, доцент*²
rostmax@rambler.ru

¹ Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина; 350044, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Калинина, 13

² Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ; 347740, Российская Федерация, Ростовская область, г. Зерноград, ул. Ленина, 21

Аннотация. Особые условия эксплуатации электродвигателей в агропромышленном комплексе приводят к их высокой аварийности. Внедрение частотных преобразователей приводит к необходимости анализа теплового состояния электрических машин в ненормальных и аварийных режимах работы и разработки адекватной компьютерной модели процесса функционирования электропривода в различных режимах работы. Созданная авторами тепловая компьютерная модель на основе расчетов всех потерь в электрической машине дает возможность проанализировать аэродинамику машины и температурные режимы. В результате реализации модели с помощью программного продукта Comsol установлены скорости и направления воздушных потоков в отдельных составляющих электродвигателя. Отмечено, что скорость воздушного потока резко изменяется: в начале воздушного канала она составляет 14 м/с, в конце – до 3 м/с. Интерфейс мультифизика программного продукта объединяет расчеты аэродинамики и тепловое исследование. Результаты теплового анализа показали, что при номинальном режиме работы максимальная температура корпуса составила 43°C, а температура лобовой части обмотки статора – 112°C. Исследования переходного процесса пуска электродвигателя показали неравномерность нагрева передней и задней частей обмотки статора, разница температур составила 3°C. Полученная тепловая компьютерная модель позволяет установить влияние потерь в машине, состояния окружающей среды, конструктивных элементов электродвигателя на температуру отдельных составляющих объекта исследований, а также оценить изменение эксплуатационных условий работы и регулирование скорости вращения ротора. Обнаружение более нагретой части машины дает возможность правильно установить датчики температуры устройств аварийной защиты.

Ключевые слова: электродвигатель, потери, моделирование, Comsol, тепловая компьютерная модель, температура

Формат цитирования: Оськин С.В., Мирошников А.В., Нагучев З.Х., Украинцев М.М. Моделирование потерь энергии в асинхронном электродвигателе // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 4. С. 85-90. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-85-90>.

© Оськин С.В., Мирошников А.В., Нагучев З.Х., Украинцев М.М., 2023

ORIGINAL ARTICLE

Modeling of energy losses in an asynchronous electric motor**Sergey V. Oskin** , DSc (Eng), Professor¹kgauem@yandex.ru **Aleksei V. Miroshnikov**, postgraduate student¹

el-mash@kubsau.ru

Zaur H. Naguchev, postgraduate student¹

el-mash@kubsau.ru

Maksim M. Ukrainiantsev, CSc (Eng), Associate Professor²

rostmax@rambler.ru

¹ Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin; 13. Kalinina str., Krasnodar, 350044, Russian Federation² Azov-Black Sea Engineering Institute of Don SAU; 21, Lenina str., Zernograd, 347740, Rostov region, Russian Federation

Abstract. Special operating conditions of operating electric motors in the agro-industrial sector determine their high accident rate. The rapid introduction of frequency converters leads to the need to analyze the thermal state of electric machines in non-nominal and emergency operating modes and the development of relevant software simulation model of electric drive performance in various operating modes. The thermal computer model developed by the authors and based on the calculation of all losses in an electric machine makes it possible to analyze the aerodynamics of the machine and temperature conditions. As a result of the model implementation, the speeds and directions of air flows in the individual components of the electric motor are established in the Comsol software. It is noted that the air flow velocity changes dramatically from the beginning of the air channel to the end – from 14 m/s to 3 m/s. The multiphysics interface in the software product combines aerodynamic analysis and thermal research. The results of thermal analysis showed that under nominal operating conditions the maximum body temperature was 43 degrees, and the temperature of the stator winding front part was 112 degrees. Studies of the transient process of electric motor start-up showed uneven heating of the front and back parts of the stator winding, the temperature difference was 3 degrees. The obtained computer model will make it possible to establish the influence of losses in the machine, environmental conditions, constructive elements of the electric motor on the temperature of individual components of the research object. Change of operating conditions and regulation of the rotor speed can also be estimated by means of the obtained computer model. Determining a more heated part of the machine makes it possible to properly install the temperature sensors of the emergency protection devices.

Keywords: electric motor, losses, modeling, aero-dynamics, temperature, ventilation, frequency converter

For citation: Oskin S.V., Miroshnikov A.V., Naguchev Z.H., Ukrainiantsev M.M. Modeling of energy losses in an asynchronous electric motor. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2023;25(4):85-90. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-85-90>.

Введение. Высокая аварийность приводных электродвигателей в агропромышленном комплексе связана с агрессивностью и большими колебаниями параметров окружающей среды, несоответствием характеристик электродвигателя параметрам рабочей машины, низким качеством электроэнергии и т.д. Ущерб, нанесенный аварийным отключением, часто превышает стоимость отказавшего электропривода. Кроме технологического ущерба, может иметь место и экологическая составляющая убытков от отказов [1], поэтому в сельскохозяйственном производстве к качеству работы электропривода предъявляются дополнительные требования: максимальное использование перегрузочной способности электрической машины и возможность работы в аварийном режиме до окончания технологического процесса.

Исследованиям тепловых процессов, протекающих внутри электродвигателя, посвящены многие работы [2-7]. В связи с невозможностью учета реальных условий эксплуатации электродвигателей часто в расчетах принимаются различные допущения, которые иногда приводят к значительным отличиям от фактического состояния машины.

Появление частотного электропривода с набором различных функций контроля способствовало частичному решению проблемы, однако возникла проблема температурных перегрузок при низких частотах вращения [8, 9]. Появляющиеся модификации преобразователей частоты насыщаются элементами интеллектуального электропривода. Для их дальнейшего развития необходимы точные и адекватные компьютерные модели процесса функционирования электропривода в различных режимах работы. Появление

современных программных продуктов Autodesk Simulation CFD и Comsol позволяет это сделать.

Цель исследований: разработать математическую модель тепловых процессов в асинхронном электродвигателе с возможностью анализа его состояния при изменении внешних условий и режима работы, используя программное обеспечение Comsol.

Материалы и методы. Для теплового расчета электрических машин применяют методы эквивалентных тепловых схем и температурного поля. Определение температурных полей исследуемых объектов возможно с использованием численных методов расчета, из которых самым распространенным является метод конечных элементов, применяемый в ПО Comsol.

При разработке тепловой компьютерной модели сначала при помощи программного обеспечения Comsol создана геометрическая модель объекта исследований. За прототип объекта принят электродвигатель АИР63А2 мощностью 370 Вт с соответствующими конструктивными размерами. После разработки геометрической модели (рис. 1) в интерфейс «Материалы» введены все необходимые характеристики отдельных конструктивных элементов электрической машины (174 элемента).

Для расчёта отдельных физических процессов выбраны соответствующие интерфейсы. Блок «Turbulent Flow» с моделью турбулентности «Algebraic uPlus» принят для исследований течений воздушных потоков. Расчёты производились отдельно: под крышкой вентилятора, внутри электродвигателя и снаружи машины – в связи с различной скоростью воздуха в этих местах. Подачу воздуха по внешней оболочке машины осуществляет встроенный вентилятор. Циркуляцию внутри машины производят лопасти ротора.

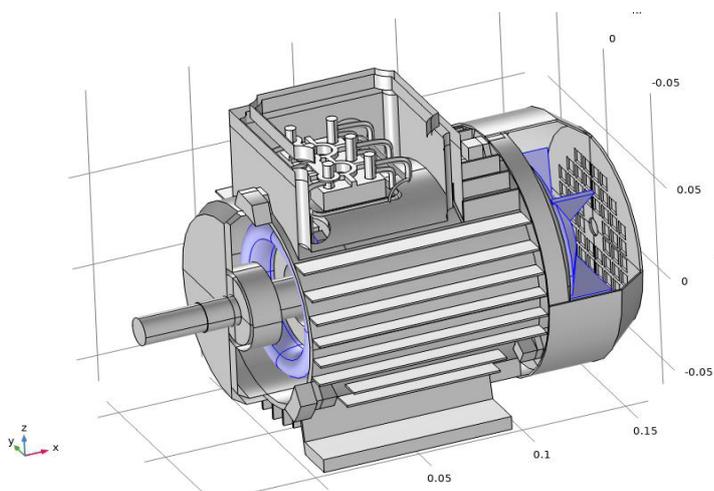


Рис. 1. Вид геометрической модели объекта исследований

Fig. 1. Type of a geometric model of the research object

С целью получения адекватных результатов по движению воздушных потоков между статором и ротором, а также под подшипниковыми щитами применен интерфейс «Rotating Domain», позволяющий производить имитации вращения ротора на различных частотах его работы [10].

Анализ теплового состояния электродвигателя проводился в блоке «Heat Transfer», позволяющем учесть как тепловые потери, так и тепловыделения. В связи с различной теплопроводностью материалов и их конфигурацией весь объект исследований разбивался на отдельные схожие структурные единицы. В качестве источников тепла, выделяющих энергию в результате электрических и электромагнитных потерь, приняты статорная обмотка, стержни и кольца ротора, электротехническая сталь статора и ротора. Учитывались дополнительные потери в подшипниках ротора и вентиляционные потери, а также теплопроводность проводников в пазах и лобовых частях обмотки статора. Программное обеспечение учитывало анизотропность материалов. Поскольку толщина пазовой изоляции очень мала, то для облегчения расчетов использовался интерфейс «Thin Layer» (тонкие пленки). Моделирование теплового состояния с учетом всех потерь проводилось с использованием мультифизического блока, позволяющего объединить расчеты по аэродинамике и движению тепла.

Конвективная теплоотдача описывается системой дифференциальных уравнений и условиями однозначности, учитывающих конвективную теплоотдачу, теплопроводность текучей среды, движение среды Навье-Стокса, неразрывность потока.

Уравнение теплопроводности электрической машины имеет классический вид:

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \rho \cdot c_p \cdot u \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} + \frac{\partial q}{\partial z} \right) = \sum Q_{source} \quad , \quad (1)$$

где c_p – теплоёмкость среды; u – скорость потока; $q = -\lambda \nabla T$ – плотность теплового потока; $\sum Q_{source}$ – общая интенсивность тепловыделений, Вт/м³.

В условия однозначности вошли геометрические и физические параметры, начальные условия. Геометрические параметры определены геометрической моделью объекта (174 домена). Построение сетки на объекте производилось с количеством степеней свободы 758603. Теплофизические постоянные при определяющей температуре,

используемые в качестве физических параметров, рассчитывались по известным методикам, применимым к электрическим машинам. Для поиска единственного решения задавались начальные условия: $t = 0$; $T(x, y, z, t) = T_0$; температура окружающего воздуха $T_0 = 20^\circ\text{C}$; дополнительных тепловых потоков на границах объекта нет; теплообмен электродвигателя с окружающим воздухом происходит с определенным коэффициентом теплообмена и с учетом тепловой конвекции.

Окончательные расчеты моделирования по тепловым полям с направлениями и интенсивностями движений воздушных масс выводились в интерфейс Result как в графическом, так и в табличном виде. Моделирование производилось в стационарном состоянии электрической машины и переходных процессах (пуск и смена скорости вращения).

Результаты и их обсуждение. Расчёты движений воздушных масс позволили получить изображения полей скоростей в отдельных составляющих машины (рис. 2). Максимальная скорость воздушного потока наблюдается из-под крышки вентилятора (до 14 м/с), в конце вентиляционного канала (вдоль ребра статора) скорость составляет порядка 3 м/с, поэтому теплоотдача снижается.

Изображения аэродинамики можно получить при различной частоте вращения ротора электродвигателя.

Тепловое поле машины в номинальном режиме представлено на рисунке 3.

При нормальной температуре окружающей среды в 25°C передняя часть корпуса электродвигателя нагревается до 43°C (рис. 3). Это связано с тем, что основное охлаждение машина получает за счёт работы внутреннего вентилятора, который установлен в задней части машины.

Анализ тепловых полей внутри электрической машины выявил наиболее нагретую часть электродвигателя – статорную обмотку (рис. 4). При этом лобовая часть со стороны рабочего конца вала нагрета максимально – до 112°C .

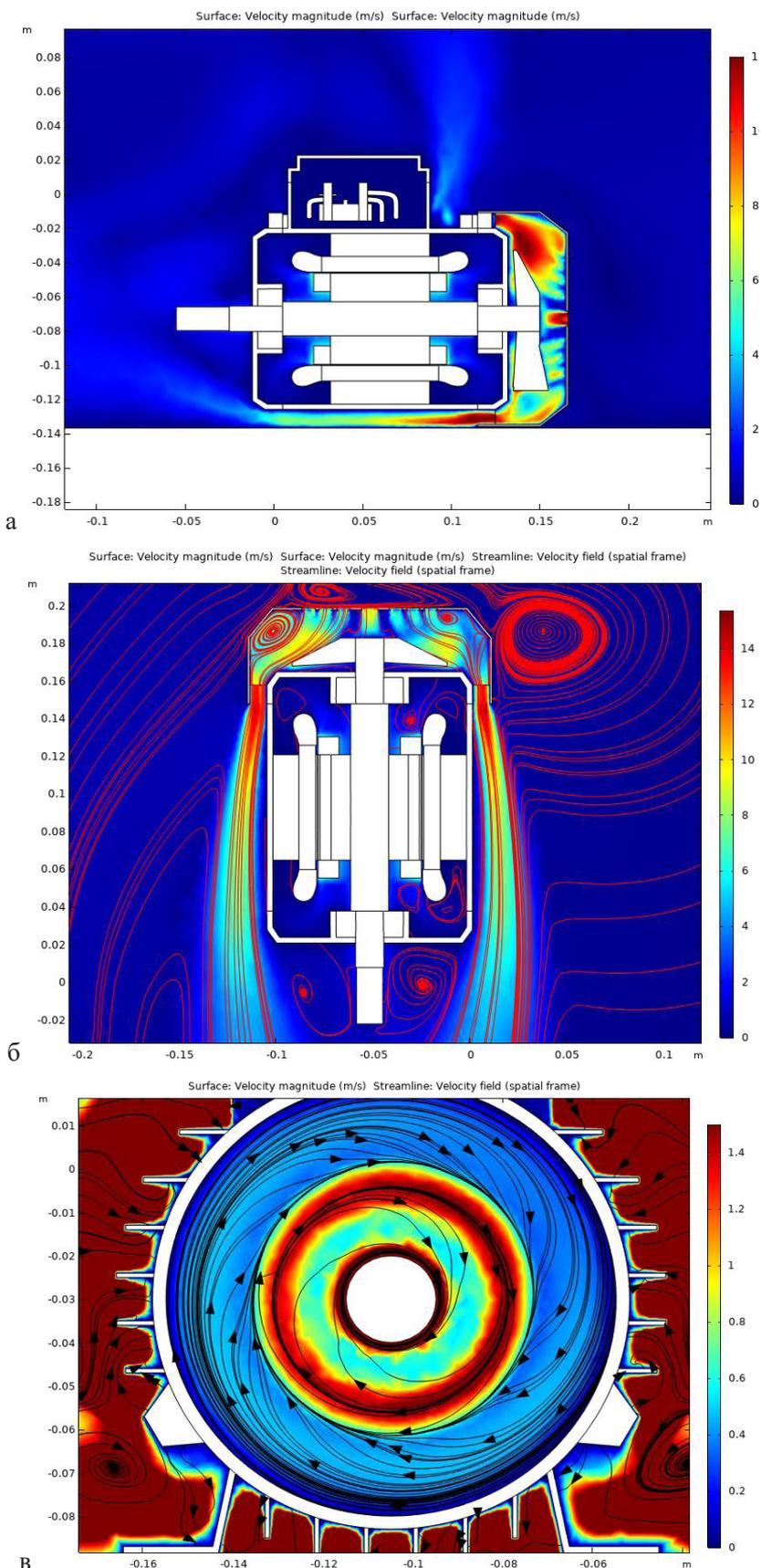


Рис. 2. Изображения полей скоростей:

а – под крышкой вентилятора; б – наружного воздуха; в – внутри электрической машины

Fig. 2. Images of velocity fields:

a- under the fan cover; b – outside air; c – inside the electric machine

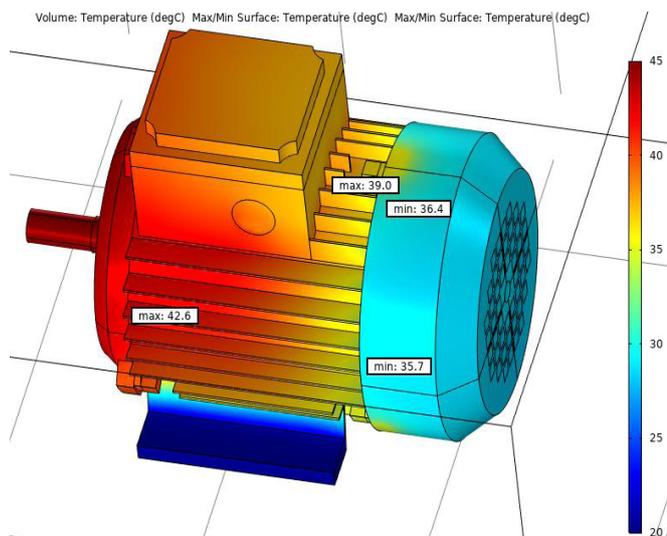


Рис. 3. Температурное поле модели электрической машины в номинальном режиме
Fig. 3. Temperature field of the electric machine model in the nominal mode

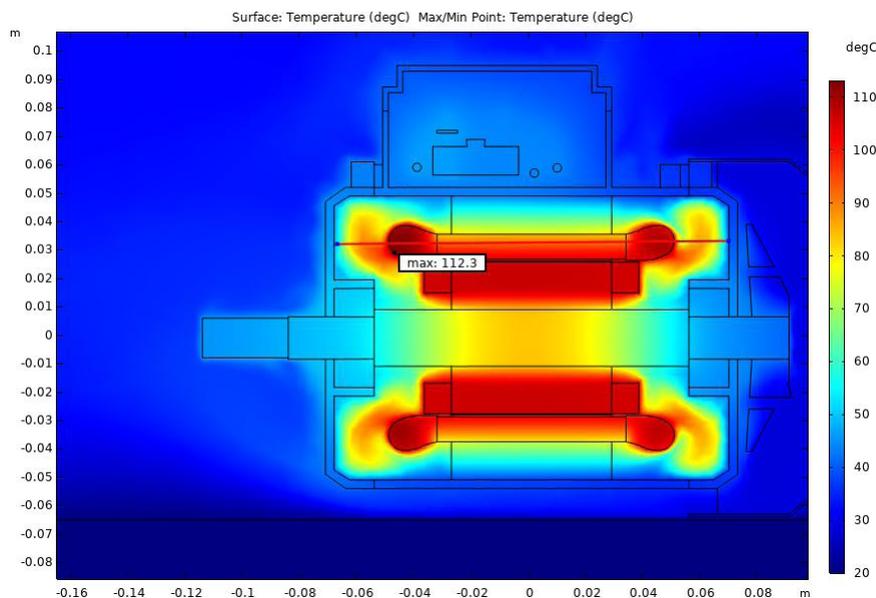


Рис. 4. Состояние внутреннего температурного поля в разрезе электродвигателя
Fig. 4. State of the internal temperature field in the electric motor cross-section

Разница температур передней и задней частей обмоток статора составляет 3...5°C. Достигнутая температура обмотки статора в номинальном режиме соответствует классу изоляции данной машины – 115°C.

Список использованных источников

1. Оськин С.В., Тарасенко Б.Ф. Надежность технических систем и экологический, экономический ущерб в сельском хозяйстве // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2014. № 101. С. 985-1004. EDN: SZVWXZ.
2. Жадан В.А., Санников Д.И. Методика расчета температуры ребристых обдуваемых корпусов электрических машин

При частоте вращения ротора 1000 об/мин температура лобовой части достигла 160°C, что приведёт к старению изоляции.

Созданная тепловая компьютерная модель проверялась на адекватность путём сопоставления результатов моделирования с экспериментальными данными. Анализ температур отдельных составляющих электрической машины, проведенный с использованием термопар, показал, что в установившемся режиме экспериментальная температура отличается от модельной: разница температур лобовых частей со стороны рабочей части вала составила 1...2°C, а со стороны вентилятора – 11°C; температура внешней стороны корпуса машины отличается в среднем на 4°C, пазов статора – на 2...3°C.

Тепловая компьютерная модель позволяет провести анализ теплового состояния электродвигателя в аварийных режимах (поломка крыльчатки вентилятора, повышенное загрязнение оболочки статора, заторможенный ротор). При необходимости применения температурной защиты электродвигателя можно определить наиболее нагретые части для установки датчиков температуры с соответствующей классификационной температурой.

Выводы

1. Тепловая компьютерная модель физических процессов электродвигателя в программном обеспечении Comsol, основанная на расчётах электрических, электромагнитных, механических и вентиляционных потерь, адекватна реальному состоянию объекта исследований и позволяет проводить анализы температурных полей, отдельных составляющих машины в высокодетализированном виде.

2. Тепловая компьютерная модель позволяет получать результаты в стационарном (установившемся режиме работы) и в переходных режимах (пуск, смена скорости вращения ротора.), а также при питании от преобразователя частоты тока.

References

1. Oskin S.V., Tarasenko B.F. Reliability of technical systems and environmental and economic losses in agriculture. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2014;101:985-1004. (In Rus.)
2. Zhadan V.A., Sannikov D.I. Calculation technique of the temperature of finned ventilated cases of electric machines. *Izvestia of Tomsk Polytechnic Institute*. 1968;190:106-111. (In Rus.)

// Известия Томского политехнического института. 1968. Т. 190. С. 106-111. URL: [bulletin_tpu-1968-v190-17_bw.pdf](#).

3. Жадан В.А., Санников Д.И. Несимметрия нагрева корпуса электрических машин с внешним обдувом // Известия Томского политехнического института. 1967. Т. 172. С. 104-111. URL: [bulletin_tpu-1967-v172-19_bw.pdf](#).

4. Осташевский Н.А., Петренко А.Н. Исследование теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя при изменении нагрузки // Электротехніка і електромеханіка. 2010. № 3. С. 25-29. EDN: RWNPQV.

5. Петренко А.Н. Экспериментальное исследование нагрева частотно-управляемого асинхронного двигателя при различных источниках питания // Электротехніка і електромеханіка. 2010. № 5. С. 21-23. EDN: RWNQDD.

6. Петушков М.Ю. Тепловая модель асинхронного двигателя // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2011. № 4 (162). С. 48-50. EDN: OCQJEJ.

7. Klimenta D.O., Hannukainen A. Novel approach to analytical modelling of steady-state heat transfer from the exterior of tefc induction motors. *Thermal science*. 2017;21(3):1529-1542. <https://doi.org/10.2298/TSCI150629091K>

8. Осташевский Н.А., Шайда В.П., Петренко А.Н. Исследование теплового состояния асинхронного частотно-управляемого двигателя с помощью метода конечных элементов // Электротехніка і електромеханіка. 2011. № 5. С. 39-42. EDN: RWCNBJ.

9. Oskin S.V., Miroshnikov A.V. Defining acceptable motor reduction in variable-speed drives of agricultural machinery. *International conference on industrial engineering, applications and manufacturing (ICIEAM)*. 2020;1-5. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM48468.2020.9111949>

10. Oskin S.V., Miroshnikov A.V., Tsokur D.S. Investigation of the aerodynamic characteristics of electric motors when regulating their speed in the Comsol package. *International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. 2021:585-590. <https://doi.org/10.1109/RusAutoCon52004.2021.9537420>

Критерии авторства

С.В. Оськин – концептуализация, методология, руководство исследованием

А.В. Мирошников, З.Х. Нагучев, М.М. Украинцев – формальный анализ, проведение исследования, создание окончательной версии рукописи и ее редактирование

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

Статья поступила в редакцию 29.03.2023; поступила после рецензирования и доработки 05.04.2023; принята к публикации 06.04.2023

3. Zhadan V.A., Sannikov D.I. Unbalanced heating of an electric machine body with external blowing. *Izvestia of Tomsk Polytechnic Institute*. 1968;190:106-111. (In Rus.)

4. Ostashevsky N.A., Petrenko A.N. Thermal state of a frequency-controlled induction motor under load variation. *Elektrotehnika i Elektromekhanika*. 2010;3:25-29. (In Rus.)

5. Petrenko A.N. Experimental study of a frequency-controlled induction motor heating under different power sources. *Elektrotehnika i Elektromekhanika*. 2010;5:21-23. (In Rus.)

6. Petushkov M.Y. Thermal model of asynchronous motor. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Technical Sciences*. 2011;4 (162):48-50. (In Rus.)

7. Klimenta D.O., Hannukainen A. Novel approach to analytical modelling of steady-state heat transfer from the exterior of tefc induction motors. *Thermal science*. 2017;21(3):1529-1542. <https://doi.org/10.2298/TSCI150629091K>

8. Ostashevskiy N.A., Shayda V.P., Petrenko A.N. Research into thermal state of a frequency-controlled asynchronous motor by means of a finite element method. *Elektrotehnika i Elektromekhanika*. 2010;3:25-29. (In Rus.)

9. Oskin S.V., Miroshnikov, A.V. Defining acceptable motor reduction in variable-speed drives of agricultural machinery. *2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. 2020. pp. 1-5. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM48468.2020.9111949>

10. Oskin S.V., Miroshnikov A.V., Tsokur D.S. Investigation of the aerodynamic characteristics of electric motors when regulating their speed in the comsol package. *2021 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. 2021. pp. 585-590. <https://doi.org/10.1109/RusAutoCon52004.2021.9537420>

Contribution of the authors

S.V. Oskin – conceptualisation, methodology, research supervision
A.V. Miroshnikov, Zh.Kh. Naguchev, M.M. Ukraintsev – formal analysis, conducting the study, revising and editing of the final manuscript

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 29.03.2023; revised 05.04.2023; accepted 06.04.2023