Научная статья УДК 621.313.333.2 DOI: 10.14529/power220408

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАГРЕВА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ НА ОСНОВЕ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ТЕПЛОВОЙ СХЕМЫ

**К.Р. Валиуллин**, valiullinkamil91@gmail.com **С.И. Тушев**, s\_tushev@inbox.ru Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

Аннотация. Наибольшая доля отказов асинхронных двигателей в промышленности связана с перегревом изоляции статорной обмотки в результате неправильной эксплуатации оборудования. В данной работе применены методы математического моделирования тепловых процессов асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором для оценки теплового состояния элементов конструкции электродвигателя. Моделирование основано на методе эквивалентных тепловых схем для стационарного нагрева. За основу взята математическая модель, состоящая из 10 основных узлов электрической машины. В работе поставлена задача экспериментальным путем проверить адекватность предложенной математической модели и дать оценку возможности ее применения для диагностики состояния электродвигателя путем измерения тока статора без использования встроенных датчиков. Результаты моделирования были проверены экспериментальным путем с использования встроенных датчиков. Результаты моделирования были проверены экспериментальным путем с использования с сделан вывод о возможности применения предложенной модели для исследования тепловых сделан вывод о возможности применения предложенной модели для исследования тепловых режимов асинхронного двигателя, с короткозамкнутым ротором.

*Ключевые слова:* математическое моделирование, нагрев, эквивалентная тепловая схема, асинхронный двигатель

Для цитирования: 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

Original article DOI: 10.14529/power220408

## MATHEMATICAL MODEL OF HEATING AN ASYNCHRONOUS MOTOR WITH A SQUIRREL-CAGE ROTOR BASED ON AN EQUIVALENT THERMAL CIRCUIT

### *K.R. Valiullin*, valiullinkamil91@gmail.com *S.I. Tushev*, s\_tushev@inbox.ru Orenburg State University, Orenburg, Russia

*Abstract.* The largest share of failures of asynchronous motors in industry is associated with overheating of the stator winding insulation as a result of improper operation of the equipment. In this paper, methods of mathematical modeling of thermal processes of an asynchronous motor with a squirrel-cage rotor are applied to assess the thermal state of the elements of the electric motor design. The simulation is based on the method of equivalent thermal circuits for stationary heating. The mathematical model consisting of 10 main units of the electric machine is taken as a basis. The aim of the paper is to experimentally test the adequacy of the proposed mathematical model and evaluate the possibility of its application for diagnosing the state of the electric motor by measuring the stator current without using built-in sensors. The simulation results were verified experimentally using thermal imaging equipment. Based on the results of comparing the mathematical model and experimental data, it was concluded that the proposed model can be used to study the thermal regimes of an asynchronous motor with a squirrel-cage rotor.

Keywords: mathematical modeling, heating, equivalent thermal circuit, asynchronous motor

*For citation:* Valiullin K.R., Tushev S.I. Mathematical model of heating an asynchronous motor with a squirrelcage 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

© Валиуллин К.Р., Тушев С.И., 2022

Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2022. Т. 22, № 4. С. 67–76 ISSN 1990-8512 (Print) ISSN 2409-1057 (Online)

### Введение

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором являются наиболее распространенным типом электрических машин в электроприводе промышленных и технологических установок [1]. Основная доля отказов электродвигателей связана с выходом из строя изоляции статорной обмотки [2-4], вызванной ее перегревом в результате неправильной эксплуатации. В связи с этим возникает необходимость адекватной оценки температуры обмоток электродвигателя для оценки срока службы двигателя и его энергетических показателей. Анализ литературы позволяет сделать вывод о наличии большого количества разработанных методов оценки температуры, основанных как на прямых методах, так и на косвенных, с применением математического моделирования [5-7]. Наиболее распространённым способом расчета является метод эквивалентной тепловой схемы [8, 9], который позволяет оценить температуру *n*-го узла электрической машины в заданный момент времени при неизменной нагрузке на валу двигателя. В данном случае сложность модели определяется количеством узлов [10, 11] с большим количеством входных параметров.

Тепловые модели, представленные в [3] и [7] состоят из большого количества узлов, что значительно усложняет процесс моделирования, а также требует большое количество входных данных, таких как геометрические параметры магнитной и электрической цепи машины, большинство которых получить возможно только на стадии проектирования. Из этого возникает необходимость упрощения математической модели с сохранением ее адекватности. Для расчета температуры при изменяющейся нагрузке применяют нестационарные модели нагрева, которые описываются системой дифференциальных уравнений, в основе которых лежит уравнение теплового баланса [12]. Отдельно стоит отметить тот факт, что на срок службы двигателя и, соответственно, изоляции большое влияние оказывает кратковременное изменение нагрузки на валу [13,14].

#### Постановка задачи

В данной работе была поставлена задача экспериментально подтвердить адекватность модели нагрева асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором на основе эквивалентной тепловой схемы.

В качестве основы эквивалентной тепловой схемы была взята математическая модель, предложенная в [15], состоящая из 10 основных узлов. Особенность данной модели является ее простота и наличие основных узлов, которые являются критически важными при оценке теплового состояния машины.

Данная модель была доработана путем учета потерь в роторе асинхронной машины, а также путем учета сопротивления внутреннего воздуха машины.

Общий вид уравнения, описывающего тепловое состояние *i*-го узла:

$$\frac{\partial \Theta_i}{\partial t} = P_i - \sum_{n=1}^n \frac{\Theta_i - \Theta_n}{R_{i,n}}, \quad i = 1...n,$$
(1)

где  $\partial \Theta_i$  – малое приращение температуры узла за время  $\partial t$ ;  $P_i$  – мощность электрических потерь в узле, Вт;  $\Theta_i$  –значение температуры узла, °C;  $\Theta_n$  –значение температуры смежного (соседнего) узла, °C;  $R_{i,n}$  – тепловое сопротивление между *i*-м и смежным узлом.

Основные узлы двигателя, участвующие в расчете, представлены на рис. 1.

На рис. 1 представлены следующие узлы: 1 – корпус двигателя; 2 – статор; 3 – статорный зубец; 4 – статорная часть обмотки; 5 – лобовая часть обмотки; 6 – железо ротора; 7 – кольцо ротора; 8 – вал ротора; 9 – внутренний воздух; 10 – воздушный зазор.

На рис. 2 представлена расчетная схема эквивалентной тепловой схемы рассматриваемого двигателя.

В табл. 1 представлены тепловые сопротивления эквивалентной тепловой схемы.



Рис. 1. Расположение расчетных узлов электродвигателя Fig.1. Location of the calculated units of the electric motor

Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering. 2022, vol. 22, no. 4, pp. 67–76 ISSN 1990-8512 (Print) ISSN 2409-1057 (Online)



Рис. 2. Расчетная схема электродвигателя Fig. 2. Calculation scheme of the electric motor

### Таблица 1

### Тепловые сопротивления эквивалентной схемы

Table 1

### Thermal resistances of the equivalent circuit

Тепловое	Элемент двигателя		
$R_1$	Тепловое сопротивление между корпусом машины и окружающим воздухом		
<i>R</i> <sub>2</sub>	Тепловое сопротивление между корпусом и статором		
R <sub>3</sub>	Аксиальное тепловое сопротивление между статором и внутренним воздухом		
$R_4$	Радиальное тепловое сопротивление сердечника статора		
<i>R</i> <sub>5</sub>	Радиальное тепловое сопротивление от статора к корпусу		
R <sub>6</sub>	Радиальное тепловое сопротивление между зубцом и статором		
<i>R</i> <sub>7</sub>	Аксиальное тепловое сопротивление между зубцом и внутренним воздухом		
$R_8$	Радиальное тепловое сопротивление от зубца к статору		
$R_9$	Радиальное тепловое сопротивление зубца статора		
R <sub>10</sub>	Радиальное сопротивление от зубца статора к сердечнику статора		
<i>R</i> <sub>11</sub>	Радиальное тепловое сопротивление между зубцом и воздушным зазором		
R <sub>12</sub>	Радиальное тепловое сопротивление между статорной обмоткой и статором		
R <sub>13</sub>	Аксиальное тепловое сопротивление между статорной частью обмотки и лобовой		
$R_{14}$	Ралиальное тепловое сопротивление от статорной обмотки до статора		

Тепловое сопротивление	Элемент двигателя			
R <sub>15</sub>	Радиальное тепловое сопротивление между статорной обмоткой и воздушным зазором			
R <sub>16</sub>	Радиальное тепловое сопротивление от воздушного зазора до зубца статора			
R <sub>17</sub>	Радиальное тепловое сопротивление от воздушного зазора до статорной обмотки			
R <sub>18</sub>	Радиальное тепловое сопротивление от воздушного зазора до ротора			
R <sub>19</sub>	Аксиальное тепловое сопротивление от лобовой части обмотки до статорной части			
R <sub>20</sub>	Тепловое сопротивление между лобовой частью обмотки и внутренним воздухом			
R <sub>21</sub>	Тепловое сопротивление между лобовой частью (серединой) обмотки и внутренним воздухом			
R <sub>22</sub>	Аксиальное тепловое сопротивление между внутренним воздухом и корпусом			
R <sub>23</sub>	Аксиальное тепловое сопротивление между внутренним воздухом и статором			
R <sub>24</sub>	Тепловое сопротивление от внутреннего воздуха до зубца статора			
R <sub>25</sub>	Тепловое сопротивление от внутреннего воздуха до лобовой части обмотки			
R <sub>28</sub>	Аксиальное тепловое сопротивление между стержнями ротора и внутренним воздухом			
R <sub>29</sub>	Аксиальное тепловое сопротивление стержней ротора			
R <sub>30</sub>	Радиальное тепловое сопротивление от стержней ротора до воздушного зазора			
R <sub>31</sub>	Радиальное тепловое сопротивление между стержнями ротора и железом			
R <sub>32</sub>	Аксиальное тепловое сопротивление между железом ротора и внутренним воздухом			
R <sub>33</sub>	Радиальное сопротивление железа ротора			
R <sub>34</sub>	Радиальное сопротивление от железа ротора до стержней			
R <sub>35</sub>	Радиальное тепловое сопротивление между ротором и валом			
R <sub>36</sub>	Радиальное тепловое сопротивление от вала до ротора			
R <sub>37</sub>	Аксиальное тепловое сопротивление между валом и подшипниками			

Обобщенная формула для нахождения теплового сопротивления элемента двигателя имеет вид [3]:

$$R = \frac{l}{\alpha \cdot \varepsilon \cdot S},\tag{2}$$

где l – длина или толщина элемента машины;  $\alpha$  – коэффициент конвективной теплоотдачи;  $\varepsilon$  – коэффициент теплового излучения; S – площадь элемента машины,  $M^2$ .

При этом коэффициент конвективной теплоотдачи для воздуха рассчитывается по следующим формулам [11]:

$$\alpha = \frac{\alpha_{B03,I}}{D_{a,I}} \cdot \left( \frac{1,36 \cdot 0,518 \cdot Ra^{\frac{1}{6}}}{\left( 1 + \left( \frac{0,559}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right)^{2}, \quad (3)$$

где  $\alpha_{\text{возд}}$  – теплопроводность воздуха при 20 °C;  $D_{\text{ад}}$  – эквивалентный диаметр машины, м<sup>2</sup>; Ra – число Рэлея:

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot D_{a\mu}^{3}}{v^{2}},$$
(4)

где *g* – ускорение свободного падения; β – коэффициент объемного расширения; ν – кинематический коэффициент вязкости; Pr – число Прандтля:

$$\Pr = \frac{v}{K},\tag{5}$$

где К – коэффициент температуропроводности:

$$K = \frac{\gamma}{c \cdot \rho},\tag{6}$$

где  $\gamma$  – коэффициент теплопроводности; *с* – удельная теплоемкость воздуха, Дж/К;  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

Приращение температуры  $\Delta T$  для каждого узла определяется по формуле

$$\Delta T = G^{-1} \cdot \Delta P, \tag{7}$$

где  $G^{-1}$  – обратная матрица проводимостей [15];  $\Delta P$  – матрица потерь двигателя, которая складывается из потерь в железе статора, активных потерь обмотки статора, а также добавочных потерь. Матрица проводимостей в общем виде имеет вид

$$G = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_{1,i}} & -\frac{1}{R_{1,2}} & \dots & -\frac{1}{R_{1,n}} \\ -\frac{1}{R_{2,1}} & \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_{2,i}} & \dots & -\frac{1}{R_{2,n}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -\frac{1}{R_{n,1}} & -\frac{1}{R_{n,2}} & \dots & \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_{n,i}} \end{pmatrix},$$
(8)

Элементы матрицы определяются по формулам, представленным в [11, 15].

Потери в электродвигателе  $\Delta P$  определяются по формулам (9)–(15):

Потери в обмотке статора  $\Delta P_{ost}$ , Вт [8]:

$$\Delta P_{ost} = 3 \cdot I_{st}^2 \cdot R_{st},\tag{9}$$

где  $I_{st}$  – ток статора, А;  $R_{st}$  – активное сопротивление обмотки статора, Ом.

Потери в стали статора  $\Delta P_{st}$ , Вт [8]:

$$\Delta P_{st} = p_{1,0/50} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^{\beta} \times \\ \times \left(k_{\pi a} \cdot B_{\pi a}^2 \cdot m_a + k_{\pi z} \cdot B_{z c p}^2 \cdot m_{z1}\right), \tag{10}$$

где  $p_{1,0/50} = 2,5$  – удельные потери при индукции 1 Тл и частоте перемагничивания 50 Гц, Вт/кг [8];  $f_1$  – частота, Гц;  $\beta$  – показатель степени, учитывающий зависимость потерь в стали от частоты перемагничивания,  $\beta = 1,4$  [8];  $k_{\rm дa}$  и  $k_{\rm дz}$  – коэффициенты, учитывающие влияние на потери в стали неравномерности распределения потока по сечениям участков магнитопровода и технологических факторов;  $k_{\rm дa} = 1,6$  – для машин мощностью меньше 250 кВт [8];  $k_{\rm дz} = 1,7$  – для машин мощностью меньше 250 кВт [8];  $B_{\rm дa}$  и  $B_{\rm zcp}$  – индукция в ярме и средняя индукция в зубцах статора;  $m_{\rm a}$  – масса стали ярма:

$$m_{\rm a} = \pi \cdot \left( D_{\rm a} - h_{\rm a} \right) \cdot h_{\rm a} \cdot l_{\rm crl} \cdot k_{\rm cl} \cdot \gamma_{\rm c}, \qquad (11)$$

где  $D_{\rm a}$  – внешний диаметр статора, м;  $l_{\rm cr1}$  – длина статора, м;  $k_{\rm c1}$  – коэффициент скоса паза;  $\gamma_{\rm c}$  – удельная масса стали;  $h_{\rm a}$  – высота ярма статора:

$$h_{\rm a} = 0, 5 \cdot (D_{\rm a} - D) - h_{\rm n1},$$
 (12)

где D – внутренний диаметр статора, м;  $h_{n1}$  – высота паза, м;  $m_{z1}$  – масса зубца статора:

$$m_{z1} = h_{z1} \cdot b_{z1cp} \cdot Z_1 \cdot l_{cr1} \cdot k_{c1} \cdot \gamma_c, \qquad (13)$$

где  $h_{z1}$  – расчетная высота зубца статора, м;  $b_{z1cp}$  – средняя ширина зубца статора:

$$b_{z1cp} = \frac{b_{z1max} + b_{z1min}}{2},\tag{14}$$

Потери в короткозамкнутом роторе  $\Delta P_{rot}$ , Вт [8]:

$$\Delta P_{rot} = Z_2 \cdot I_{rot}^2 \cdot R_{rot}, \qquad (15)$$

где  $Z_2$  – количество стержней в роторе, шт.;  $I_{rot}$  – ток ротора, А;  $R_{rot}$  – сопротивление короткозамкнутого ротора (стержни и кольца), Ом.

 $\Delta P_{dob}$  — добавочные потери принимаем в 5—8 раз меньше основных [8].

После расчета основных и добавочных потерь составляется вектор-столбец основных и добавочных потерь [15]:

Для проверки математической модели был собран стенд, на котором проводилось измерение температуры обмоток двигателя при различных режимах работы.

#### Постановка эксперимента

Для измерений был выбран асинхронный двигатель АИР100L4ПРУЗ с номинальной мощностью 4 кВт и скоростью холостого хода 1410 об/мин. Корпус двигателя и боковые крышки выполнены из чугуна, схема соединений обмоток – звезда, класс нагревостойкости изоляции – F. Эксперимент проводился при температуре окружающего воздуха 24–25 °С. В качестве нагрузочной машины выступал двигатель постоянного тока мощностью 1,9 кВт с возможностью регулирования момента в необходимом диапазоне. Во время эксперимента поддерживалось значение момента нагрузки 18 Н·м.

Эксперимент проводился в следующем порядке: подавалось напряжение на асинхронный двигатель, в течение 2–3 с он выходил на режим холостого хода, затем включалась нагрузочная машина, на котором при помощи встроенного индикатора выставлялся момент на валу. В течение 15 мин происходила нагрузка асинхронного двигателя, этого времени было достаточно для достижения температурой установившегося режима. Отключение стенда происходило в обратном порядке с одновременным снятием показаний температуры.

Контроль температуры корпуса двигателя и его обмоток производился при помощи двух температурных датчиков, установленных в статорной и лобовой части обмоток, а также при помощи тепловизора.

На рис. 3 показана термограмма двигателя, на которой отчетливо видно нагретую лобовую часть обмотки, зубцы статора.

Экспериментальные данные были сравнены с результатами моделирования и представлены на рис. 4, 5.

В табл. 2 и 3 представлены результаты моделирования и эксперимента с расчетом относительной погрешности температуры для каждого узла машины.

По результатам эксперимента видно, что наименьшая погрешность температуры наблюдается в статорной и лобовой части обмотки двигателя. Это вызвано следующими факторами: в модели достаточно корректно учтены активные потери в обмотке статора, учитывается обмен теплоты как со статорным железом, так и внутренним воздухом. Результаты моделирования также подтверждают результаты работ [16–18], в которых указано, что температура лобовой части обмотки выше температуры



Рис. 3. Контроль температуры обмоток электродвигателя тепловизором Fig. 3. Monitoring the temperature of the motor windings with a thermal imager





Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering. 2022, vol. 22, no. 4, pp. 67–76 ISSN 1990-8512 (Print) ISSN 2409-1057 (Online)





Таблица 2

## Сравнение результатов моделирования и эксперимента при работе двигателя под нагрузкой

Table 2

## Comparison of simulation and experiment results when the engine is running under load

Узел	Модель, °С	Эксперимент, °С	Погрешность, °С	Погрешность, %
Корпус	81	82	1	1,2
Статор	100	85	15	15
Зубец статора	100	91	9	9
Статорная часть обмот-	103	104	1	0,96
ки	105			
Лобовая часть обмотки	110	116	6	5,17
Короткозамкнутое	100	91	9	9
кольцо ротора	100			
Железо ротора	97	89	8	8,24
Вал	67	61	6	8,95

### Таблица 3

# Сравнение результатов моделирования и эксперимента при работе двигателя на холостом ходу

Table 3

## Comparison of the results of simulation and experiment when the engine is idling

Узел	Модель, °С	Эксперимент, °С	Погрешность, °С	Погрешность, %
Корпус	72	64	8	11
Статор	89	82	7	7,8
Зубец статора	89	82	7	7,8
Статорная часть обмотки	91	98	7	7,1
Лобовая часть обмотки	97	109	12	11
Короткозамкнутое	88	66	22	25
кольцо ротора	00			
Железо ротора	86	66	20	23,2
Вал	61	56	5	8,1

#### Электротехнические комплексы и системы Electrotechnical complexes and systems

обмотки, уложенной в пазах статора. При этом потери в статорном железе и добавочные потери имеют свою погрешность, связанную с магнитными характеристиками машины. Наибольшие отклонения модели от экспериментальных данных наблюдаются в роторной части машины. Это обусловлено невозможностью снятия всех геометрических параметров ротора [3].

### Выводы

1. Экспериментальные данные подтверждают результаты математического моделирования, что позволяет применять метод ЭТС для определения температуры обмоток электродвигателя с достаточной точностью в решении прикладных задач. Для улучшения результатов необходимо учесть механические потери, более качественно учесть активные потери в роторе. Однако для частей двигателя, не связанных с ротором, точности исследованной модели достаточно.

2. Увеличение количества узлов модели позволит получить более дифференцированные данные по температуре электродвигателя.

3. Рассмотренная модель нагрева асинхронного двигателя демонстрирует хорошие результаты для стационарных режимов работы с неизменной нагрузкой. Для оценки изменения температуры при изменении нагрузки необходимо применять нестационарные модели, в основе которых лежит тепловой баланс машины: применяемый метод ЭТС в данном случае должен быть сильно изменен.

### Список литературы

1. Жежеленко И.В., Кривоносов В.Е., Василенко С.В. Критерии выявления межвитковых замыканий в ста-торных обмотках с использованием векторного анализа фазных токов электродвигателя // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 3. С. 202–218. DOI: 10.21122/1029-7448-2021-64-3-202-218

2. Зюзев А.М., Метельков В.П. Учет колебаний температуры обмотки статора асинхронного двигателя при проверке по нагреванию в повторно-кратковременном режиме // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2015. Т. 326, № 4. С. 146–153.

3. Котеленец Н.Ф., Кузнецов Н.Л. Испытания и надежность электрических машин: учеб. пособие для вузов по спец. «Электромеханика». М.: Высш. шк., 1988. 232 с.

4. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / под ред. Л.Г. Мамиконянца. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1984. 240 с.

5. On-line capacitance and dissipation factor monitoring of AC stator insulation / K. Younsi, P. Neti, M. Shah et al. // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2010. Vol. 17, no. 5. P. 1441–1452. DOI: 10.1109/TDEI.2010.5595545

6. Staton D.A., Cavagnino A. Convection Heat Transfer and Flow Calculations Suitable for Electric Machines Thermal Models // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2008. Vol. 55, no. 10. P. 3509–3516. DOI: 10.1109/TIE.2008.922604

7. Зализный Д.И., Широков О.Г., Попичев В.В. Адаптивная математическая модель тепловых процессов асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. 2015. № 1 (60). С. 31–43.

8. Копылов И.П., Клоков Б.К., Морозкин В.П., Токарев Б.Ф. Проектирование электрических машин: учеб. для вузов. 3-е изд., испр. и доп. М.: Высш. шк., 2002. 757 с.

9. 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

10. Бондаренко Д.А. Автоматическая система управления температурой тягового асинхронного двигателя тепловоза: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Брянск, 2018. 24 с.

11. Kylander G. Thermal Modelling of Small Cage Induction Motors: Technical Report No. 265. Goteborg, Sweden, Chalmers University of Technology, 1995. 113 p.

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

13. Макаров А.В., Вечеркин М.В., Завьялов А.С. Обзор тепловых моделей асинхронных двигателей // Электротехнические системы и комплексы. 2013. № 21. С. 75–84.

14. Иванов П.Ю., Дульский Е.Ю., Худоногов А.М. Локальный перегрев изоляции асинхронных вспомогательных машин электровозов в переходных режимах работы // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. Т. 20, № 11. С. 194–200. DOI: 10.21285/1814-3520-2016-11-194-200

15. Popova, L. Combined electromagnetic and thermal design platform for totally enclosed induction machines. Lappeenranta: Lappeenranta university of technology, 2010. 76 p.

16. Пугачев А.А., Бондаренко Д.А. Результаты экспериментальных исследований тепловых процессов в асинхронном двигателе // Вестник Брянского государственного технического университета. 2015. № 3 (47). С. 77–82. DOI: 10.12737/23012 17. Mellor P.H., Roberts D., Turner D.R. Lumped parameter thermal model for electrical machines of TEFC design // IEE Proceedings B (Electric Power Applications). 1991. Vol. 138, iss. 5. P. 205–218. DOI: 10.1049/ip-b.1991.0025

18. Champenois G., Roye D. Zhu D.S. Electrical and thermal performance predictions in inverter-fed squirrelcage induction motor drives // Electric Machines & Power Systems. 1994. Vol. 22, no. 3. P. 355–369. DOI: 10.1080/07313569408955572

### References

1. Zhezhelenko I.V., Kryvonosov V.E., Vasilenko S.V. Criteria for detecting turn-to-turn short circuit in stator windings using vector analysis of electric motor phase currents. *Izvestiâ vysših učebnyh zavedenij i ènergetičeskih ob"edinennij SNG. Ènergetika.* 2021;64(3):202–218. (In Russ.) DOI: 10.21122/1029-7448-2021-64-3-202-218

2. Zyuzev A.M., Metel'kov V.P. Accounting temperature fluctuations in stator winding of induction motor when checking for heating in intermittent mode. *Bulletin of the Tomsk polytechnic university. Geo assets engineering*. 2015;326(4):146–153. (In Russ.)

3. Kotelenets N.F., Kuznetsov N.L. *Ispytaniya i nadezhnost' elektricheskikh mashin: ucheb. posobiye dlya vuzov po spets. "Elektromekhanika"* [Testing and reliability of electrical machines: a textbook for universities in the specialty "Electromechanics"]. Moscow: Vysshaya shkola; 1988. 232 p. (In Russ.)

4. Syromyatnikov I.A. *Rezhimy raboty asinkhronnykh i sinkhronnykh dvigateley* [Modes of operation of asynchronous and synchronous motors]. 4th ed. Moscow: Energoatomizdat; 1984. 240 p. (In Russ.)

5. Younsi K., Neti P., Shah M. et al. On-line capacitance and dissipation factor monitoring of AC stator insulation. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2010;17(5):1441–1452. DOI: 10.1109/TDEI.2010.5595545

6. Staton D.A., Cavagnino A. Convection Heat Transfer and Flow Calculations Suitable for Electric Machines Thermal Models. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2008;55(10):3509–3516. DOI: 10.1109/TIE.2008.922604

7. 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.)

8. Kopylov I.P., Klokov B.K., Morozkin V.P., Tokarev B.F. *Proyektirovaniye elektricheskikh mashin: uchebnik dlya vuzov* [Design of electrical machines: a textbook for universities]. 3rd ed. Moscow: Vysshaya shkola; 2002. 757 p. (In Russ.)

9. 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

10. Bondarenko D.A. Avtomaticheskaya sistema upravleniya temperaturoy tyagovogo asinkhronnogo dvigatelya teplovoza: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk [Automatic temperature control system for a traction asynchronous diesel locomotive engine. Abstract of cand. sci. diss.]. Bryansk; 2018. 24 p. (In Russ.)

11. Kylander G. Thermal Modelling of Small Cage Induction Motors: Technical Report No. 265. Goteborg, Sweden, Chalmers University of Technology; 1995. 113 p.

12. Petushkov M.Yu. Thermal model of asynchronous motor. University News. North-Caucasian region. Technical sciences = Izvestiya Vuzov. Severo-Kavkazskii region. Technical science. 2011.  $\mathbb{N}$  4 (162). C. 48–50. (In Russ.)

13. Makarov A.V., Vecherkin M.V., Zavjalov A.S. Overview of thermal models for asynchronous machines. *Electrotechnical Systems and Complexes*. 2013;21:75–84. (In Russ.)

14. Ivanov P.Yu., Dulskiy E.Yu., Khudonogov A.M. Local insulation overheating of asynchronous auxiliary machines of electric locomotives in transient operating conditions. *Proceedings of Irkutsk state technical university* = *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta*. 2016;20(11):194–200. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2016-11-194-200

15. Popova, L. Combined electromagnetic and thermal design platform for totally enclosed induction machines. Lappeenranta: Lappeenranta university of technology; 2010. 76 p.

16. Pugachev A.A., Bondarenko D.A. Results of the experimental investigation of thermal processes in induction motor. *Bulletin of Bryansk state technical university*. 2015;3(47):77–82. (In Russ.) DOI: 10.12737/23012

17. Mellor P.H., Roberts D., Turner D.R. Lumped parameter thermal model for electrical machines of TEFC design. *IEE Proceedings B (Electric Power Applications)*. 1991;138(5):205–218. DOI: 10.1049/ip-b.1991.0025

18. Champenois G., Roye D. Zhu D.S. Electrical and thermal performance predictions in inverter-fed squirrel-cage induction motor drives. *Electric Machines & Power Systems*. 1994;22(3):355–369. DOI: 10.1080/07313569408955572

### Информация об авторах

Валиуллин Камиль Рафхатович, канд. техн. наук, доц. кафедры электро- и теплоэнергетики, Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия; valiullinkamil91@gmail.com.

**Тушев Сергей Игоревич**, аспирант, Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия; s\_tushev@inbox.ru.

### Information about the authors

Kamil R. Valiullin, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Electricity and Heat Power Engineering, Orenburg State University, Orenburg, Russia; valiullinkamil91@gmail.com.

Sergey I. Tushev, Postgraduate Student, Orenburg State University, Orenburg, Russia; s\_tushev@inbox.ru.

Статья поступила в редакцию 29.09.2022; одобрена после рецензирования 16.11.2022; принята к публикации 24.11.2022.

The article was submitted 29.09.2022; approved after review 16.11.2022; accepted for publication 24.11.2022.