

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 621.313.333.2

Камиль Рафкатович Валиуллин

ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», кандидат технических наук, доцент кафедры электро- и теплоэнергетики, Россия, Оренбург, e-mail: valiullinkamil91@gmail.com

Сергей Игоревич Тушев

ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», аспирант кафедры автоматизированного электропривода, электромеханики и электротехники, Россия, Оренбург, e-mail: s_tushev@inbox.ru

Комбинированная математическая модель нагрева асинхронного двигателя

Авторское резюме

Состояние вопроса. Существующие тепловые модели асинхронных двигателей либо требуют большого количества вычислений и исходных данных, либо обладают недостаточной точностью. В связи с этим актуальным является создание методик теплового расчета электрических двигателей, обладающих достаточной точностью при небольшом количестве вычислений.

Материалы и методы. Для построения математической модели нагрева асинхронного двигателя использованы методы математического моделирования, метод эквивалентных тепловых схем для расчета превышения температуры частей двигателя.

Результаты. Предложена комбинированная математическая модель расчета температуры асинхронного двигателя, сочетающая метод эквивалентной тепловой схемы и метод расчета превышения температуры ротора, позволяющая сократить количество узлов тепловой схемы без увеличения погрешности расчета. Разработан алгоритм параллельного расчета теплового состояния неподвижной части электрической машины и ротора.

Выводы. Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности применения разработанной модели для расчета теплового состояния двигателей: погрешность расчета комбинированной модели ниже, чем при расчете методом эквивалентной тепловой схемы. Полученные алгоритмы могут быть доработаны и интегрированы в общую эквивалентную тепловую схему, что позволит использовать предложенный метод для расчета двигателей с фазным ротором.

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

Kamil' Rafkatovich Valiullin

Orenburg State University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Electrical and Heat Power Engineering Department, Russia, Orenburg, e-mail: valiullinkamil91@gmail.com

Sergey Igorevich Tushev

Orenburg State University, Postgraduate Student of Automated Electric Drive, Electromechanics and Electrical Engineering Department, Russia, Orenburg, e-mail: s_tushev@inbox.ru

Combined mathematical model of heating an asynchronous motor

Abstract

Background. Existing thermal models of asynchronous motors either require a large number of calculations and source data or have poor accuracy. Thus, it is relevant to develop methods of thermal calculation of electric motors that have adequate accuracy with a small number of calculations.

Materials and methods. To design a mathematical model of heating an asynchronous motor, methods of mathematical simulation, and the method of equivalent thermal circuits are used to calculate the temperature rise of motor parts.

Results. The authors have proposed a combined mathematical model to calculate the temperature of an asynchronous motor. It combines the method of equivalent thermal circuit and the method of calculating the temperature rise of the rotor, which allows reducing the number of nodes of the thermal circuit without increasing the simulation error. An algorithm of parallel calculation of the thermal state of the fixed part of the electric machine and the rotor has been developed.

Conclusions. The results obtained allow us to conclude that the developed model can be used to calculate the thermal state of motors. The calculation error of the combined model is lower than when calculating using the equivalent thermal circuit method. The obtained algorithms can be improved and integrated into the general equivalent thermal circuit. It will allow us to use the proposed method to calculate the motors with a phase-wound rotor.

Key words: mathematic simulation, asynchronous motor, equivalent thermal circuit, rotor heating

DOI: 10.17588/2072-2672.2023.6.050-056

Введение. Целью большинства научных работ, посвященных разработке тепловых моделей электродвигателей [1–3], является нахождение компромисса между упрощением модели с уменьшением количества расчетных узлов и сохранением достаточной точности модели. Одним из наиболее применимых методов теплового расчета двигателей является метод эквивалентной тепловой схемы (ЭТС).

Первый путь упрощения эквивалентной тепловой схемы асинхронного двигателя – уменьшение количества продольных узлов в цепи статора и ротора. Этот подход позволяет оценить среднее превышение температуры каждого из элементов машины, например статорной обмотки [4, 5]. Этот подход дает приемлемые результаты, если целью моделирования является получение температуры конкретного узла электрической машины, однако для остальных узлов, расположенных в продольном сечении, погрешность расчета может увеличиваться.

Другой подход – исключение наименее важных узлов машины, например боковых крышек и подшипниковых узлов, что приводит к искажению результатов моделирования, так как их температура и теплоемкость оказывают влияние на соседние узлы двигателя.

В [6] представлено экспериментальное подтверждение адекватности тепловой модели асинхронного двигателя на базе эквивалентной тепловой схемы, состоящей из 10 основных узлов, включающих статор, лобовую и статорную части обмотки, а также ротор. По результатам эксперимента, модель показала достаточную точность (погрешность модели в пределах 5,17 %) относительно температур статорной и лобовой частей обмотки, но имела существенные расхождения в отношении температур ротора: до 11 % при работе двигателя под нагрузкой и до 25 % на холостом ходу. Необходимо от-

метить, что, несмотря на наличие между ротором и статором воздушного зазора с низкой теплопроводностью, изменение параметров ротора в моделях, построенных на основе метода ЭТС, вносит искажение и в температуры статорной части двигателя, что увеличивает погрешность расчета. В связи с этим уточнение модели в целях более точного расчета температур ротора двигателя является актуальной задачей для увеличения точности тепловой модели двигателя.

Методы исследования. Ниже предложена методика расчета температуры электрического двигателя в установившемся режиме, основанная на объединении метода эквивалентной тепловой схемы и метода расчета превышения температуры ротора двигателя, предложенного в [7]. В этом случае превышение температуры рассчитывается исходя из электрических потерь и магнитных свойств ротора машины без учета влияния теплового воздействия статора.

Нагрев ротора при продолжительной работе определяется по формуле

$$\Theta_2 = \frac{p_1 + p_2 k_{12}}{\Lambda_1}, \quad (1)$$

где p_2 – пульсационные потери, Вт; k_{12} – коэффициент, учитывающий общий расход воздуха через активную часть машины; p_1 – электрические потери в роторе, Вт:

$$p_1 = m_1 I_2'^2 r_2', \quad (2)$$

где m_1 – количество фаз статора; r_2' – приведенное активное сопротивление ротора, Ом; I_2' – приведенный ток ротора, А:

$$I_2' = I_c \frac{m_2 \omega_2 k_{\omega 2}}{m_1 \omega_1 k_{\omega 1}}, \quad (3)$$

где m_2 – количество фаз ротора; $\omega_2 = 0,5$ [7]; $k_{\omega 2} = 1$ [7]; $k_{\omega 1}$ – обмоточный коэффициент; I_c – ток стержня, А [7]:

$$I_c = \frac{P_1}{Z_2 E_{20} (1 - S)}, \quad (4)$$

где Z_2 – количество фаз ротора (для короткозамкнутого ротора); P_1 – номинальная мощность, Вт; S – скольжение; E_{20} – электродвижущая сила на фазу, В:

$$E_{20} = E_{10} \frac{\omega_2 k_{\omega 2}}{\omega_1 k_{\omega 1}}, \quad (5)$$

где E_{10} – электродвижущая сила, которую можно принять равной

$$E_{10} = (0,97 - 0,95) U_1, \quad (6)$$

где $U_1 = 220$ В – фазное напряжение; ω_1 – количество витков на фазу статора:

$$\omega_1 = \frac{E_{10}}{\pi \sqrt{2} f_1 k_{\omega 1} \Phi}, \quad (7)$$

где f_1 – частота питающей сети, Гц; Φ – магнитный поток основной волны, Вб:

$$\Phi = \frac{2}{\pi} I_f \tau B_\delta, \quad (8)$$

где I_f – длина статора, мм; τ – полюсное деление, мм; B_δ – магнитная индукция в зазоре, Тл [8]:

$$B_\delta = B \xi \varphi_{FE}, \quad (9)$$

где φ_{FE} – коэффициент заполнения длины; B – средняя индукция в зубцах, Тл; ξ – отношение ширины паза к шагу:

$$\xi = \frac{b_z}{t_1}, \quad (10)$$

где b_z – ширина зубца, мм; t_1 – шаг паза, мм:

$$t_1 = \frac{\pi D}{Z_1}, \quad (11)$$

где Z_1 – количество пазов статора; D – диаметр статора, мм;

$$I_2' = \frac{S E_{10}}{I_2}; \quad (12)$$

$$\Lambda_1' = \alpha_\delta S_\delta + \alpha_\lambda S_\lambda, \quad (13)$$

где α_δ – коэффициент теплоотдачи воздушного зазора:

$$\alpha_\delta = 0,0028 (1 + \sqrt{0,5 \cdot v_a}), \quad (14)$$

где v_a – окружная скорость ротора, м/с; α_λ – коэффициент теплоотдачи стержня ротора:

$$\alpha_\lambda = 0,0028 (1 + \sqrt{0,45 \cdot v_a}); \quad (15)$$

$$S_\delta = \pi D l; \quad (16)$$

$$S_\lambda = 4\pi D_\lambda (a + b), \quad (17)$$

где D_λ – диаметр кольца, мм; $a + b$ – размеры кольца, мм.

Превышение над входящим воздухом, град, составляет

$$\Theta = \Theta_2 + 0,5 \cdot \Theta_{\text{возд}}. \quad (18)$$

Температура ротора, град, составляет

$$\Theta_{\text{рот.м}} = \Theta + \Theta_{\text{возд}}. \quad (19)$$

Описанные выше формулы позволяют оценить температуру ротора в виде отдельного

узла, в котором не учитывается нагрев от соседних частей электрической машины.

В отличие от предложенной ранее модели, представленной в [6] на основе эквивалентной тепловой схемы, в которой температура в большей части определялась геометрическими параметрами ротора и взаимными влияниями соседних узлов (статора, воздушного зазора, вала, подшипникового узла), в предложенном методе потери ротора рассчитываются упрощенным способом, что позволяет снизить количество исходных данных и вычислительных операций без увеличения погрешности моделирования.

Нами предлагается рассчитывать среднее превышение температуры ротора без учета теплового влияния соседних узлов, при этом моделирование параметров ротора ведется параллельно с расчетом по методу ЭТС для обеспечения адекватности результатов расчета температур в статорной части, в которой необходимо учитывать ротор машины в виде эквивалентного сопротивления. При полном исключении ротора из эквивалентной схемы погрешность моделирования резко увеличивается, что недопустимо.

Для оценки температуры узлов двигателя, не связанных с ротором, используется метод ЭТС, подробно описанный в [5, 6]. Существенным отличием предлагаемой нами модели является уменьшение числа расчетных узлов: все узлы, связанные с ротором, заменяются эквивалентным тепловым сопротивлением, значение которого можно определить по формулам:

$$R_{31} = R_{31} + R_{32} + R_{33} + R_{34} + R_{30}; \quad (20)$$

$$R_{32} = R_{28} + R_{29}. \quad (21)$$

Вид эквивалентной тепловой схемы при этом показан на рис. 1. Метод составления эквивалентной тепловой схемы и ее основные узлы подробно описаны в [6]. Сопротивления, указанные на рис. 1 представлены в табл. 1.

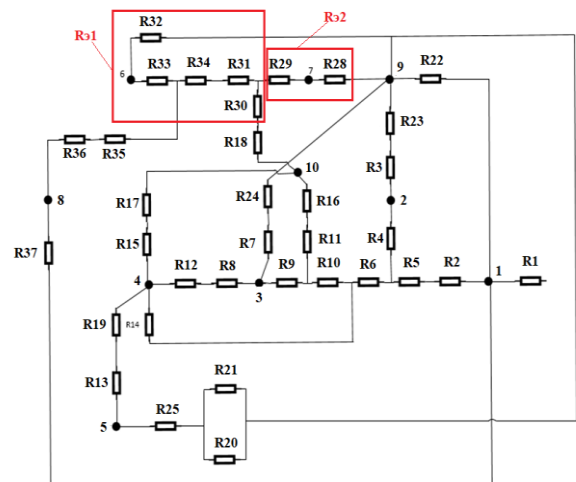


Рис. 1. Тепловая схема двигателя с учетом эквивалентного сопротивления ротора

Таблица 1. Сопротивления эквивалентной схемы

Тепловое сопротивление	Элемент двигателя
R_1	Тепловое сопротивление между корпусом машины и окружающим воздухом
R_2	Тепловое сопротивление между корпусом и статором
R_3	Аксиальное тепловое сопротивление между статором и внутренним воздухом
R_4	Радиальное тепловое сопротивление сердечника статора
R_5	Радиальное тепловое сопротивление от статора к корпусу
R_6	Радиальное тепловое сопротивление между зубцом и статором
R_7	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_{10}	Радиальное сопротивление от зубца статора к сердечнику статора
R_{11}	Радиальное тепловое сопротивление между зубцом и воздушным зазором
R_{12}	Радиальное тепловое сопротивление между статорной обмоткой и статором
R_{13}	Аксиальное тепловое сопротивление между статорной частью обмотки и лобовой
R_{14}	Радиальное тепловое сопротивление от статорной обмотки до статора
R_{15}	Радиальное тепловое сопротивление между статорной обмоткой и воздушным зазором
R_{16}	Радиальное тепловое сопротивление от воздушного зазора до зубца статора
R_{17}	Радиальное тепловое сопротивление от воздушного зазора до статорной обмотки
R_{18}	Радиальное тепловое сопротивление от воздушного зазора до ротора
R_{19}	Аксиальное тепловое сопротивление от лобовой части обмотки до статорной части
R_{20}	Тепловое сопротивление между лобовой частью обмотки и внутренним воздухом
R_{21}	Тепловое сопротивление между лобовой частью (серединой) обмотки и внутренним воздухом
R_{22}	Аксиальное тепловое сопротивление между внутренним воздухом и корпусом
R_{23}	Аксиальное тепловое сопротивление между внутренним воздухом и статором
R_{24}	Тепловое сопротивление от внутреннего воздуха до зубца статора
R_{25}	Тепловое сопротивление от внутреннего воздуха до лобовой части обмотки
R_{28}	Аксиальное тепловое сопротивление между стержнями ротора и внутренним воздухом
R_{29}	Аксиальное тепловое сопротивление стержней ротора
R_{30}	Радиальное тепловое сопротивление от стержней ротора до воздушного зазора
R_{31}	Радиальное тепловое сопротивление между стержнями ротора и железом
R_{32}	Аксиальное тепловое сопротивление между железом ротора и внутренним воздухом
R_{33}	Радиальное сопротивление железа ротора
R_{34}	Радиальное сопротивление от железа ротора до стержней
R_{35}	Радиальное тепловое сопротивление между ротором и валом
R_{36}	Радиальное тепловое сопротивление от вала до ротора
R_{37}	Аксиальное тепловое сопротивление между валом и подшипниками

Матрица тепловых сопротивлений состоит из тепловых сопротивлений статорного железа ($R_2 - R_{11}$), статорной части обмотки ($R_{12} - R_{17}$), лобовой части обмотки ($R_{19} - R_{20}$). Матрица проводимостей при этом имеет общий вид [9]:

$$G = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{1,i}} & -\frac{1}{R_{1,2}} & \dots & -\frac{1}{R_{1,n}} \\ -\frac{1}{R_{2,1}} & \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{2,i}} & \dots & -\frac{1}{R_{2,n}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -\frac{1}{R_{n,1}} & -\frac{1}{R_{n,2}} & \dots & \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{n,i}} \end{pmatrix}. \quad (22)$$

Тогда матрица потерь принимает вид

$$\Delta P = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{\Delta P_{st}}{2} \\ \frac{\Delta P_{st} + 0,3 \cdot \Delta P_{dob}}{2} \\ 0,48 \cdot \Delta P_{st} + 0,4 \cdot \Delta P_{dob} \\ \frac{0,52 \cdot \Delta P_{ost}}{2} \\ 0 \\ \frac{0,3 \cdot \Delta P_{dob}}{2} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (23)$$

где ΔP_{st} – потери в стали статора; ΔP_{dob} – добавочные потери; ΔP_{ost} – потери в обмотке статора.

Предлагаемый алгоритм моделирования температуры электрической машины, совмещающий метод ЭТС и расчет превышения температуры ротора, представлен на рис. 2.

Анализ тепловой схемы двигателя (см. рис. 1) показывает, что из модели ЭТС при замене ротора эквивалентным сопротивлением могут быть исключены узлы 6 и 7, характеризующие параметры ротора. Тем самым общая тепловая схема упрощается в части ротора, что уменьшает количество необходимых вычислений и исходных данных, тем самым упрощая модель. В дальнейших исследованиях эквивалентные тепловые сопротивления могут быть заменены некоторым коэффициентом, учитывающим тепловые свойства ротора.

Для проверки предлагаемой модели был произведен эксперимент, заключающийся в нагреве двигателя до установившейся температуры и сравнении результатов эксперимента с расчетными значениями. Нагрузка двигателя осуществлялась при помощи нагрузочной машины постоянного тока, работающей в режиме генератора. Испытательный стенд позволял изменять момент нагрузки в широких диапазонах [10]. Для проведения опыта двигатель выводился на номинальный режим работы, через 15 минут наблюдался установившийся тепловой

баланс, после чего осуществлялось отключение двигателя от сети и снятие данных. Опыт проводился при температуре окружающего воздуха $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

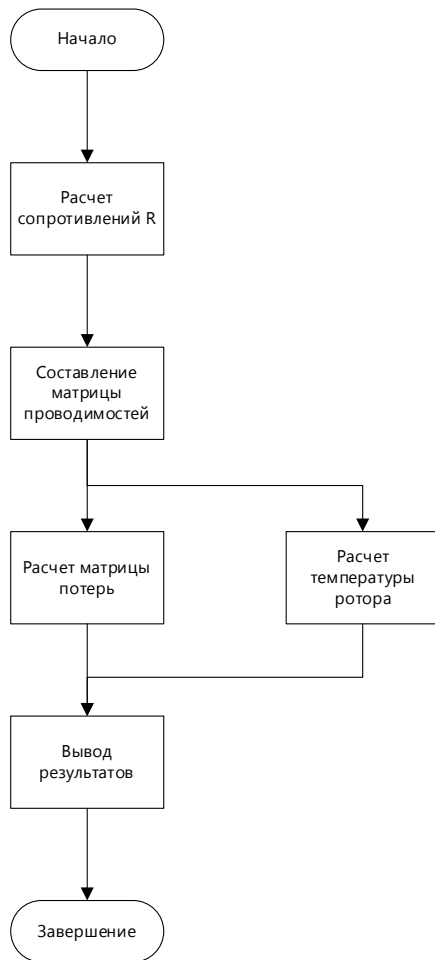


Рис. 2. Алгоритм расчета превышения температуры двигателя

Паспортные данные двигателя представлены в табл. 2. Результаты расчета температуры ротора показаны в табл. 3.

Таблица 2. Технические параметры асинхронного двигателя

Номинальная частота вращения, об/мин	1410
Номинальная мощность, кВт	4
$\cos \varphi$	0,84
КПД, %	0,82
Длина статора, м	0,103
Радиус статора до сердечника, м	0,07
Внутренний радиус статора, м	0,053
Высота паза, м	0,017
Длина ротора, м	0,12
Радиус ротора, м	0,057
Высота кольца, м	0,022
Ширина кольца, м	0,008
Число пазов ротора, шт.	34

Таблица 3. Результаты расчета температуры ротора

Электрические потери в роторе p_1 , Вт	2,454
Ток стержня I_c , А	208,78
Электродвижущая сила на фазу E_{20} , В	0,58
Количество витков на фазу статора ω_1 , шт.	198
Магнитная индукция B_s , Тл	0,00008
Отношение ширины паза к шагу, ξ	0,666
Коэффициент теплоотдачи воздушного зазора α_{δ}	0,00915
Коэффициент теплоотдачи стержня ротора $\alpha_{л}$	0,0088
Превышение над входящим воздухом Θ , $^{\circ}\text{C}$	19,72
Температура ротора $\Theta_{\text{рот.м}}$, $^{\circ}\text{C}$	44,72

На рис. 3 представлена термограмма ротора асинхронного двигателя после продолжительной работы при номинальном токе. Температуры ротора указаны в табл. 4 для точек, показанных на рис. 3 в момент остановки двигателя. Необходимо отметить, что полученные в ходе эксперимента температуры несколько занижены, так как измерения осуществлялись после снятия крышки двигателя, т. е. примерно через 1–2 минуты после остановки двигателя. На рис. 4 представлены результаты сравнительного анализа данных эксперимента и предлагаемой комбинированной модели, совмещающей метод эквивалентной тепловой схемы асинхронного двигателя и теплового расчета ротора при продолжительном режиме работы. В табл. 5 представлены результаты сравнения погрешностей моделей.

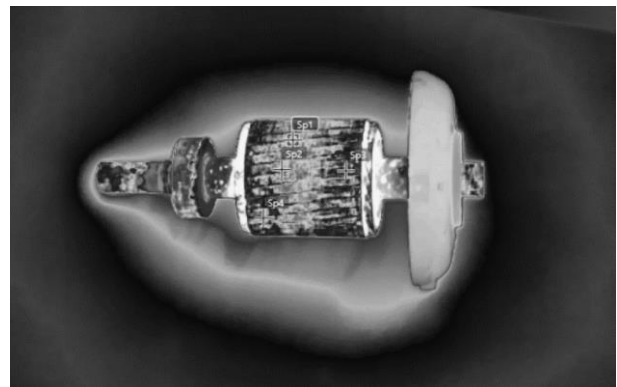


Рис. 3. Термограмма ротора асинхронного двигателя при номинальной нагрузке

Таблица 4. Результаты измерения температуры ротора

Точка	Температура, $^{\circ}\text{C}$
Sp1 (стержень ротора)	44,3
Sp2 (железо ротора)	39,5
Sp3 (кольцо ротора)	52,2
Sp4 (железо ротора – наименее нагретая область)	48,9
Среднее значение, $^{\circ}\text{C}$	46,225

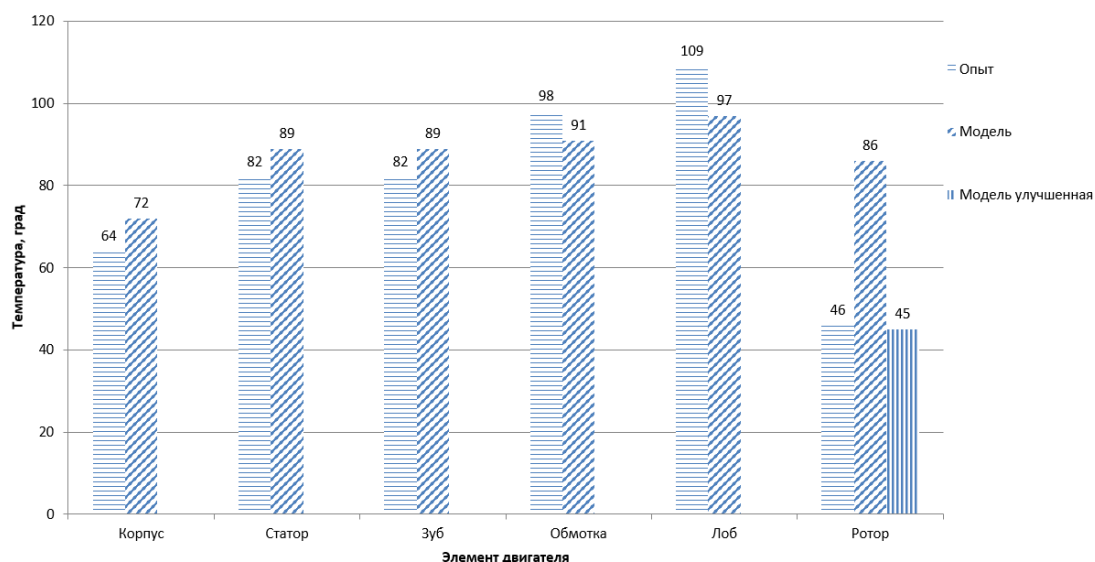


Рис. 4. Результаты сравнения классической модели ЭТС и ЭТС с предложенной методикой расчета температуры ротора

Таблица 5. Результаты сравнения классической модели ЭТС и ЭТС с предложенной методикой расчета температуры ротора и их погрешности

Узел	Модель ЭТС, °С	Комбинированная модель, °С	Эксперимент, °С	Погрешность комбинированной модели, %
Корпус	72	72	64	11,1
Статор	89	89	82	7,9
Зубец статора	89	89	82	7,9
Статорная часть обмотки	91	91	98	7,7
Лобовая часть обмотки	97	97	109	12,4
Ротор	86	45	46	2,2

Результаты исследования. Исходя из результатов эксперимента, погрешность расчета температуры ротора уменьшилась на 44,3 % при сохранении точности расчета для остальных узлов двигателя. Результат достигнут за счет того, что модель ЭТС не позволяет точно моделировать температуры роторной части двигателя без сложных геометрических измерений. Кроме того, модель, описанная в [6], учитывает тепловыделение ротора, представленного в виде цилиндрического тела, без учета магнитных потерь и зависимости скольжения от тока ротора, что также не способствует увеличению точности расчетов. Погрешность расчета температуры остальных узлов двигателя при использовании комбинированного метода не увеличилась, так как ротор в модели ЭТС был заменен эквивалентным сопротивлением, не вносящим искажений в расчет других узлов двигателя.

Также необходимо отметить, что отдельный расчет температуры ротора двигателя может позволить с достаточной точностью моделировать тепловой режим двигателей с фазным ротором, что невозможно при использовании классической модели ЭТС.

Выводы. Применение метода расчета превышения температуры ротора в зависимости

от конфигурации двигателя, мощности, габаритов статора, а также в зависимости от тока ротора и магнитных характеристик двигателя позволяет достаточно точно определять среднее превышение температуры железа ротора, что в совокупности с методом ЭТС позволяет оценивать температурные режимы двигателя с погрешностью в 5–7 % в каждом из его основных узлов. Использование комбинированной модели позволило исключить основной недостаток тепловой модели двигателя на основе ЭТС – недостаточную точность расчетов температуры двигателя в его роторной части.

Предложенная математическая модель расчета температур асинхронного двигателя позволяет увеличить точность моделирования температур в части ротора, может быть интегрирована в общую модель эквивалентной тепловой схемы путем уменьшения и замены тепловых сопротивлений в узле ротора либо путем замены ротора эквивалентным сопротивлением, зависящим от габаритов и мощности машины, и параллельным моделированием статорной и роторной части. Предложенная модель позволяет не только увеличить точность моделирования, но и сократить число узлов в ЭТС, что уменьшает сложность модели и количество необходимых вычислений. Экспериментальная проверка

модели показала, что точность расчета температуры ротора увеличилась на 44,3 % по сравнению с методом ЭТС.

Предложенная модель может применяться для расчета тепловых режимов асинхронных двигателей с фазным ротором на основе эквивалентной тепловой схемы с небольшими изменениями, заключающимися в изменении количества фаз ротора.

Список литературы

1. **Kylander G.** Thermal modelling of small cage induction motors. – Göteborg, 1995. – P. 113.
2. **Петушков М.Ю.** Тепловая модель асинхронного двигателя // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Сер.: Технические науки. – 2011. – № 4. – С. 48–50.
3. **Макаров А.В., Вечеркин М.В., Завьялов А.С.** Обзор тепловых моделей асинхронных двигателей // Электротехнические системы и комплексы. – 2013. – № 21. – С. 75–84.
4. **Бондаренко Д.А.** Автоматическая система управления температурой тягового асинхронного двигателя тепловоза: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Брянск, 2018. – 24 с.
5. **Ророва L.** Combined electromagnetic and thermal design platform for totally enclosed induction machines. – Finland, 2010. – P. 62.
6. **Валиуллин К.Р., Тушев С.И.** Математическая модель нагрева асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором на основе эквивалентной тепловой схемы // Вестник ЮУрГУ. Сер.: Энергетика. – 2022. – № 4.
7. **Постников И.М.** Проектирование электрических машин: учеб. пособие. – Киев: Гостехиздат УССР, 1952. – 736 с.
8. **Копылов И.П., Клоков Б.К., Гольдберг О.Д.** Проектирование электрических машин: учебник для вузов. – М., 2002. – 757 с.
9. **David A., Cavagnino A.** Stator Convection Heat Transfer and Flow Calculations Suitable for Electric Machines Thermal Model // IEEE transactions on industrial electronics. – 2008. – Vol. 55, No. 10. – P. 3509–3516.
10. **Ключев В.И.** Теория электропривода: учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 704 с.

References

1. Kylander, G. Thermal modelling of small cage induction motors. Göteborg, 1995, p. 113.
2. Petushkov, M.Yu. Teplovaya model' asinkhronnogo dvigatelya [Thermal model of an induction motor]. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Seriya: Tekhnicheskie nauki*, 2011, no. 4, pp. 48–50.
3. Makarov, A.V., Vecherkin, M.V., Zav'yalov, A.S. Obzor teplovykh modeley asinkhronnykh dvigateley [Overview of thermal models of asynchronous motors]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы*, 2013, no. 21, pp. 75–84.
4. Bondarenko, D.A. *Avtomaticheskaya sistema upravleniya temperaturoy tyagovogo asinkhronnogo dvigatelya teplovoza*. Avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk [Automatic temperature control system for the traction asynchronous motor of a diesel locomotive. Cand. tech. sci. diss.]. Bryansk, 2018. 24 p.
5. Popova, L. Combined electromagnetic and thermal design platform for totally enclosed induction machines. Finland, 2010, p. 62.
6. Valiullin, K.R., Tushev, S.I. Matematicheskaya model' nagreva asinkhronnogo dvigatelya s korotkozamknutym rotorom na osnove ekvivalentnoy teplovy skhemy [Mathematical model of heating an asynchronous motor with a squirrel-cage rotor based on an equivalent thermal circuit]. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Energetika*, 2022, no. 4.
7. Postnikov, I.M. *Proektirovanie elektricheskikh mashin* [Design of electrical machines]. Kiev: Gostekhizdat USSR, 1952. 736 p.
8. Kopylov, I.P., Klokov, B.K., Gol'dberg, O.D. *Proektirovanie elektricheskikh mashin* [Design of electrical machines]. Moscow, 2002. 757 p.
9. David, A., Cavagnino, A. Stator Convection Heat Transfer and Flow Calculations Suitable for Electric Machines Thermal Model. *IEEE transactions on industrial electronics*, 2008, vol. 55, no. 10, pp. 3509–3516.
10. Klyuchev, V.I. *Teoriya elektroprivoda* [Electric drive theory]. Moscow: Energoatomizdat, 1998. 704 p.