

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-2-126-135>

УДК 621.313.333.2

## Математическая модель расчета температуры обмоток асинхронного двигателя по температуре его корпуса

К. Р. Валиуллин<sup>1)</sup>, С. И. Тушев<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Оренбургский государственный университет (Оренбург, Российская Федерация)

**Реферат.** Одним из главных параметров, обеспечивающих нормативный срок службы электродвигателя, является соответствие класса изоляции электродвигателя его текущей температуре. Превышение температуры выше нормативного значения приводит к увеличенному расходу ресурса и преждевременному выходу из строя электродвигателя. Поэтому для уменьшения затрат на обслуживание, ремонт и замену оборудования необходимо контролировать тепловые параметры обмоток статора для предотвращения аварийных или пред-аварийных ситуаций. При этом непосредственное измерение температуры обмоток статора не всегда возможно. Целью данной работы является разработка математической модели для контроля температуры обмоток статора асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором при известной температуре корпуса двигателя. В основе работы лежит метод определения количества перенесенной теплоты через статор электродвигателя, который представлен в виде плоской стенки. Приведена математическая модель, позволяющая по известным геометрическим параметрам статора двигателя и температуре его корпуса с достаточной степенью точности определять температуру его нагрева. Теоретические расчеты подтверждены экспериментальными данными, полученными при работе двигателя в различных режимах. В ходе проведенного исследования получены результаты, подтверждающие работоспособность предложенного метода определения температуры обмоток асинхронного двигателя (в том числе бесконтактным путем). Дальнейшая работа может быть направлена в сторону улучшения математической модели и возможности контроля других точек обмотки электродвигателя. Также следует учитывать распределение тепловых потоков не только радиально, но и по оси электрической машины.

**Ключевые слова:** асинхронный электродвигатель, нагрев, моделирование, плоская стенка, температурный контроль

**Для цитирования:** Валиуллин, К. Р. Математическая модель расчета температуры обмоток асинхронного двигателя по температуре его корпуса / К. Р. Валиуллин, С. И. Тушев // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2026. Т. 69, № 2. С. 126–135. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-2-126-135>

## Mathematical Model for Calculating the Temperature of the Windings of an Asynchronous Motor Based on the Temperature of its Housing

K. R. Valiullin<sup>1)</sup>, S. I. Tushev<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Orenburg State University (Orenburg, Russian Federation)

**Abstract.** One of the main parameters that ensures the standard service life of an electric motor is accordance of the insulation class of the electric motor with its current temperature. Exceeding

---

**Адрес для переписки**

Валиуллин Камиль Рафкатович  
Оренбургский государственный университет  
просп. Победы, 13,  
460018, г. Оренбург, Российская Федерация  
Тел.: +7 (3532) 77-67-70  
valiullinkamil91@gmail.com

**Address for correspondence**

Valiullin Kamil R.  
Orenburg State University  
13, Pobedy Ave.,  
460018, Orenburg, Russian Federation  
Tel.: +7 (3532) 77-67-70  
valiullinkamil91@gmail.com

---

the temperature above the standard value causes increased resource consumption and premature failure of the electric motor. Therefore, in order to reduce the costs of maintenance, repair and replacement of equipment, it is necessary to control the thermal parameters of the stator windings to prevent emergency or pre-emergency situations. Meanwhile, direct measurement of the temperature of the stator windings is not always possible. The purpose of this work is to develop a mathematical model for controlling the temperature of the stator windings of an asynchronous electric motor with a squirrel-cage rotor at a known temperature of the motor housing. The work is based on a method for determining the amount of heat transferred through the stator of an electric motor, which is represented as a flat wall. A mathematical model is presented that makes it possible to determine the temperature of its heating with a sufficient degree of accuracy based on the known geometric parameters of the motor stator and the temperature of its housing. The theoretical calculations were confirmed by experimental data obtained when the motor was operating in various modes. As a result of the conducted research, the data confirming the operability of the proposed method for determining the temperature of the windings of an asynchronous motor (including the use of non-contact way) were obtained. Further work can be aimed at improving the mathematical model and the ability to monitor other points of the electric motor winding. It is also necessary to take into account the distribution of heat flows not only radially, but also along the axis of the electric machine.

**Keywords:** asynchronous electric motor, heating, modeling, flat wall, temperature control

**For citation:** Valiullin K. R., Tushev S. I. (2026) Mathematical Model for Calculating the Temperature of the Windings of an Asynchronous Motor Based on the Temperature of its Housing. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 69 (2), 126–135 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-2-126-135>

## Введение

Наиболее распространенным видом электрических машин на промышленных предприятиях являются асинхронные двигатели общего назначения типа АИР (4А) [1], служащие приводом для большинства технологических установок. Важным показателем состояния асинхронного двигателя во время работы является температура его обмоток. По ней можно судить о режиме работы двигателя, делать выводы о его неисправностях, проводить мониторинг состояния изоляции [2–3]. Существуют следующие способы определения температуры обмоток электродвигателя при помощи:

1) встроенных в обмотку статора датчиков температуры. Данный способ обладает самой высокой точностью, но при этом необходимо, чтобы датчики были установлены на этапе производства двигателя. Недостатками данного способа являются уязвимость датчиков к внешним воздействиям и высокая цена. Кроме того, большинство уже находящихся в эксплуатации двигателей не может быть модернизировано таким образом, чтобы стал возможен прямой контроль температуры их обмоток [4];

2) измерения тока двигателя и построения тепловых моделей. Точность данного способа во многом зависит от применяемой математической модели, а недостатком является то, что для его применения требуется большое количество исходных данных, погрешности в которых приводят к большим погрешностям в работе модели [5–12, 13];

3) внешних температурных датчиков и тепловизоров [14, 15]. Указанный способ является наиболее доступным, так как может быть применен на любом двигателе, но из-за того, что измеряется температура корпуса, а не обмоток, результаты измерения необходимо дополнительно обрабатывать, чтобы по известной температуре корпуса получить значение температуры обмотки.

### Постановка задачи

Представленные выше методы определения температуры обмоток обладают рядом недостатков, а именно, применение моделей на основе эквивалентной тепловой схемы (ЭТС) [16] требует большого количества данных о геометрических параметрах статора, ротора и обмоток. Использование встроенных датчиков затруднено ввиду сложности установки датчиков внутри обмоток электродвигателей. Следовательно, для целей измерения температуры обмоток двигателя требуется разработка таких моделей, которые позволят с достаточной точностью определять температуру обмотки с использованием минимального количества данных о геометрических параметрах электродвигателей и не предполагающих установки внутренних датчиков и внесения изменений в конструкцию двигателя. В связи с этим в данной статье предлагается способ оценки температуры обмоток асинхронного электродвигателя по данным о температуре его корпуса, что позволяет использовать внешние датчики, не требующие изменений конструкции двигателя, либо использовать бесконтактные методы измерения температуры.

### Описание метода

Предлагаемая методика расчета температуры обмоток двигателя по температуре корпуса основана на теории теплопроводности через плоскую стенку, согласно которой перенос теплоты от нагретого участка тела к менее нагретому производится благодаря теплопроводности данного тела. Тепловая энергия переносится через некоторую стенку толщиной  $\delta$  в направлении от наиболее нагретого участка тела к наименее нагретому, как показано на рис. 1, где  $T_1$  – температура источника теплоты;  $T_2$  – то же среды, при этом считается, что  $T_1 > T_2$  [17].

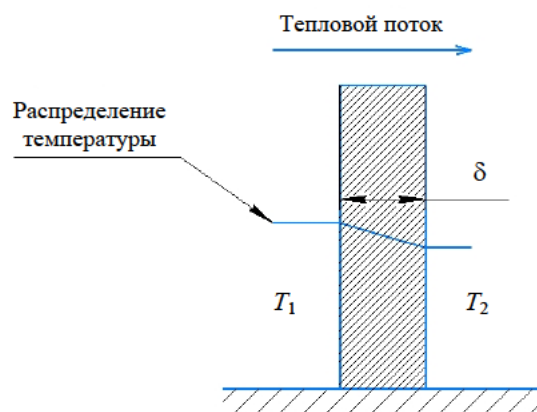


Рис. 1. Схематичное изображение теплопереноса через плоскую стенку

Fig. 1. Schematic representation of heat transfer through a thin wall

Уравнение теплопроводности в пространстве в общем виде для стационарного режима записывается [18]

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0. \quad (1)$$

Асинхронный двигатель можно представить в виде полого цилиндра (рис. 2), по внутренней стороне которого располагаются пазы с уложенной обмоткой. Плоской стенкой является спинка статора толщиной  $\delta$ , граничащая с обмоткой, нагретой до температуры  $T_1$ , и внутренней стороной корпуса, имеющей температуру  $T_2$ .

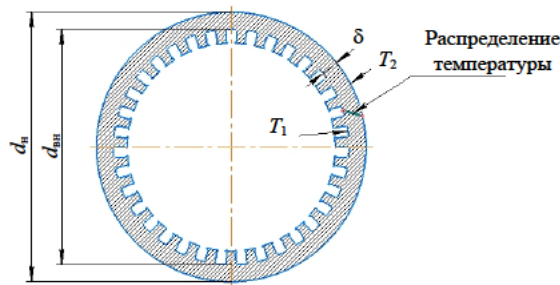


Рис. 2. Поперечное сечение статора двигателя

Fig. 2. Motor stator cross section

Тогда статор двигателя можно рассматривать как цилиндрическую стенку, уравнение теплопроводности для которой записывается в виде [18]:

$$Q = \frac{2\pi\gamma l}{\ln \frac{d_n}{d_{вн}}} (T_1 - T_2), \quad (2)$$

где  $Q$  – количество теплоты, передаваемой от более нагретого участка к менее нагретому через стенку;  $\gamma$  – коэффициент теплопроводности шихтованного железа,  $\gamma = 74 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$  [18],  $l$  – длина цилиндра, м;  $d_n$  – наружный диаметр цилиндра, м;  $d_{вн}$  – внутренний диаметр цилиндра, м.

Исходя из конструкции типовых асинхронных двигателей можно сделать вывод, что  $\frac{d_n}{d_{вн}} \leq 2$ , следовательно, статор с обмоткой двигателя мож-

но рассматривать не как цилиндрическую, а как плоскую стенку, что позволяет пренебречь рассеиванием теплоты по дуге и рассматривать теплопередачу только поперек сечения корпуса.

Уравнение теплопроводности в общем виде при распределении теплоты вдоль оси  $x$  от обмотки в сторону внешней среды в установившемся режиме принимает вид

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0. \quad (3)$$

Решением данного уравнения является выражение [18]

$$T(x) = C_1 x + C_2,$$

где  $C_1$  и  $C_2$  – постоянные интегрирования, которые определяются из граничных условий.

Уравнение Фурье (4) для расчета теплопроводности через плоскую стенку имеет вид [16]

$$q = -\gamma \frac{\partial T}{\partial n}, \quad (4)$$

где  $n$  – координата, в которой рассчитывается температура вдоль  $x$ .

Тогда с учетом (4) количество теплоты, передаваемой от ее источника через плоскую стенку, можно рассчитать по выражению [18]

$$Q = \frac{\gamma}{\delta} A(T_1 - T_2), \quad (5)$$

где  $T_1$  – превышение температуры обмотки над температурой окружающей среды, °С;  $T_2$  – температура корпуса, °С;  $A$  – площадь поверхности дна одного паза, м<sup>2</sup>,  $A = bl$ ;  $b$  – ширина паза, м;  $l$  – длина паза, м.

Тогда формула (5) принимает вид

$$Q_{\text{пер}} = \frac{\gamma}{\delta} bl(T_1 - T_2). \quad (6)$$

Так как статор двигателя граничит с корпусом, двигатель можно представить как многослойную плоскую стенку с разными коэффициентами теплопроводности, формула для расчета теплопроводности через такую стенку

$$Q_{\text{пер}} = bl \frac{(T_1 - T_2)}{\frac{\delta_1}{\gamma_1} + \frac{\delta_2}{\gamma_2}}, \quad (7)$$

где  $\delta_1$  – толщина спинки статора, м;  $\gamma_1$  – теплопроводность материала спинки статора;  $\delta_2$  – толщина корпуса, м;  $\gamma_2$  – теплопроводность материала корпуса.

Формула (7) описывает количество теплоты, передаваемой от обмотки в окружающую среду через железо статора и материал корпуса двигателя. Тепловая мощность, выделяемая в одном пазу обмотки статора, составит

$$\Delta P_{\text{обм}} = \frac{(3I^2 R)}{Z_1}, \quad (8)$$

где  $I$  – ток нагрузки двигателя, А;  $R$  – сопротивление фазы обмотки двигателя, Ом;  $Z_1$  – количество пазов статора.

При использовании формулы для расчета потерь в обмотке статора (8) предполагается, что лобовая часть обмотки не контактирует со статором, поэтому теплоотдачей со стороны лобовой части к статору можно пренебречь. Можно предположить, что результаты расчетной температуры из-за данного пренебрежения могут быть незначительно завышены.

Мощность, потребляемая асинхронным двигателем, работающим на холостом ходу, определяется только током холостого хода, который протекает по обмоткам статора. При этом скольжение стремится к 0, т. е. частота вращения ротора двигателя близка к синхронной, следовательно, потерями в обмотках ротора также можно пренебречь.

Из уравнений (7) и (8) превышение температуры обмотки  $\Delta T_{10}$  над температурой окружающей среды при работе двигателя на холостом ходу можно выразить

$$\Delta T_{10} = \frac{\frac{\delta_1}{\gamma_1} + \frac{\delta_2}{\gamma_2} \cdot 3I^2 \frac{R}{Z_1}}{bl} T_2. \quad (9)$$

Для работы под нагрузкой также необходимо учитывать потери в роторе, при этом уравнение (9) принимает вид

$$\Delta T_{10} = \frac{\left( \frac{\delta_1}{\gamma_1} + \frac{\delta_2}{\gamma_2} \right) \left( 3I^2 \frac{R}{Z_1} + \Delta P_{\text{рот}} \right)}{bl} T_2, \quad (10)$$

где  $b$  – ширина паза, м;  $\Delta P_{\text{рот}}$  – потери в роторе, зависящие от нагрузки двигателя, Вт,

$$\Delta P_{\text{рот}} = p_1,$$

$p_1$  – электрические потери в роторе [19],

$$p_1 = m_1 I_2'^2 r_2'.$$

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

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

$m_2$  – количество фаз ротора;  $\omega_2 = 0,5$ ;  $k_{\omega 2} = 1$ ;  $k_{\omega 1}$  – обмоточный коэффициент;  $I_c$  – ток стержня, А [17],

$$I_c = \frac{P_1}{m_2 E_{20} (1 - S)}, \quad (11)$$

$P_1$  – номинальная мощность, Вт;  $S$  – скольжение;  $E_{20}$  – электродвижущая сила на фазу, В, которая определяется по методике, изложенной в [19].

С учетом температуры окружающей среды формулы (9) и (10) можно представить:

– для работы на холостом ходу

$$\Delta T_{10} = \frac{\frac{\delta_1}{\gamma_1} + \frac{\delta_2}{\gamma_2} \cdot 3I^2 \frac{R}{Z_1}}{bl} T_2 + T_{\text{окр}}; \quad (12)$$

– для работы под нагрузкой

$$\Delta T_{10} = \frac{\left(\frac{\delta_1}{\gamma_1} + \frac{\delta_2}{\gamma_2}\right) \left(3I^2 \frac{R}{Z_1} + \Delta P_{\text{рот}}\right)}{bl} T_2 + T_{\text{окр}}. \quad (13)$$

В формулах (9)–(12)  $T_2$  – температура корпуса электродвигателя, °С.

### Результаты эксперимента

Для проверки предложенной математической модели проведены два эксперимента на асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором АИР56А4У3 мощностью 0,12 кВт и АИР100S2 мощностью 4 кВт. Датчики температуры (термопары) были установлены внутри паза на статорную часть обмотки. Отдельный датчик был установлен на корпусе двигателя. Эксперимент проводился в режиме холостого хода и при работе под нагрузкой. Двигатели нагружались машиной постоянного тока, работающей в режиме динамического торможения. Температура воздуха: 21,5 °С – для первого опыта; 23 °С – для измерений на втором двигателе. Двигатели работали до установления равновесного теплообмена с окружающей средой, что контролировалось по значению температуры с внешнего датчика. Результаты измерений и моделирования представлены в табл. 1.

Таблица 1

#### Результаты расчета и эксперимента

#### Results of calculation and experiment

Тип двигателя	Режим работы	Потери в статоре, Вт	Потери в роторе, Вт	Температура корпуса, °С	Расчетная температура обмотки, °С	Фактическая температура обмотки, °С	Погрешность, %
Двигатель 1 АИР56А4У3: $P = 0,12$ кВт	Холостой ход	54,36	–	41	63	62	1,5
	Нагрузка	148	40	79	129,3	120	6,9
Двигатель 2 АИР100S2: $P = 4$ кВт	Холостой ход	474	–	63	91,9	90	2,0
	Нагрузка	596,7	40	83	125,6	120	4,4

Увеличение расхождения результатов эксперимента и моделирования при работе под нагрузкой вызвано наличием воздушного зазора между статором и ротором в электродвигателе, который вносит погрешность при теплообмене между ротором и статором. Это обстоятельство никак не учитывается в предлагаемой методике.

Отдельно стоит отметить, что в предложенной модели не учитывались распределение теплоты между пазами и теплообмен с внутренним воздухом машины, а также учитывались активные потери в лобовой части обмотки машины, что привело к тому, что температура обмотки, определенная расчетным путем, оказалась немного выше фактической [13, 20].

## ВЫВОДЫ

1. Предлагаемая математическая модель может применяться для определения максимального значения температуры пазовой части обмоток асинхронных двигателей серий АИР по заданным значениям потребляемого тока и температуры корпуса двигателя в установившихся тепловых режимах работы для проведения технической диагностики.

2. Предложенный способ позволяет оценивать превышение температуры обмоток двигателя, имея минимум информации о его конструкции, для расчета температуры обмоток не требуется построение сложных эквивалентных схем либо установка внутренних датчиков.

3. Предлагаемая методика оценки температуры обмоток асинхронного двигателя может использоваться при бесконтактном способе измерения температуры корпуса электродвигателя, например при помощи пирометрического термометра. В этом случае есть возможность контролировать температуру любого электродвигателя без внесения каких-либо изменений в его конструкцию. Ограничением предложенной методики является то, что она недостаточно точно учитывает дополнительные потери и не позволяет применять ее в нестационарных режимах. Кроме того, модель позволяет с достаточной точностью рассчитывать температуру обмотки только в пазовой части статора.

4. Математическая модель может обсчитываться на промышленных контроллерах с малыми вычислительными мощностями и использоваться в системах тепловой диагностики в составе АСУ ТП предприятий. Дальнейшая работа может быть направлена в сторону улучшения модели, а также учета распределения температуры вдоль оси вращения машины.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Жежеленко, И. В. Критерии выявления межвитковых замыканий в статорных обмотках с использованием векторного анализа фазных токов электродвигателя / И. В. Жежеленко, В. Е. Кривоносов, С. В. Василенко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 3. С. 202–218. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-202-218>
2. Лицкевич, А. П. Вероятностная оценка долгосрочного ресурса морской портовой кабельной линии при воздействии случайных изменений температуры / А. П. Лицкевич, А. А. Халезин // Транспортное дело России. 2015. № 2. С. 145–149.
3. Дубяго, М. Н. Метод исследования термофлуктуационных процессов в задачах диагностики и прогнозирования изоляционных материалов / М. Н. Дубяго, Н. К. Полуянович, В. Х. Пшихопов // Вестник Донского государственного технического университета. 2017. № 3 (90). С. 117–127. <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2017-17-3-117-127>
4. Брякин, И. В. Контроль температуры обмоток и защита от перегрева электрических машин переменного тока / И. В. Брякин, И. В. Бочкарев, Х. Г. Багиев, К. К. Келебаев // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. 2019. Т. 19, № 1. С. 75–84. <https://doi.org/10.14529/power190109>
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. <https://doi.org/10.1109/tdei.2010.5595545>
6. Stator, D. A. Convection Heat Transfer and Flow Calculations Suitable for Electric Machines Thermal Model / D. A. Stator, A. Cavagnino // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2008. Vol. 55, No 10. P. 3509–3516. <https://doi.org/10.1109/tie.2008.922604>
7. Зализный, Д. И. Адаптивная математическая модель тепловых процессов асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором / Д. И. Зализный, О. Г. Широков, В. В. Попичев // Вестник ГТТУ им. П. О. Сухого. 2015. № 1 (60). С. 31–43.

8. Зюзев, А. М. Двухканальная термодинамическая модель асинхронного двигателя для систем тепловой защиты / А. М. Зюзев, В. П. Метельков // Вестник ЮУрГУ. Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 2 (39). С. 4–11. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2\(39\)-4-11](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2(39)-4-11)
9. Kylander, G. Thermal modelling of small cage induction motors: Technical Report No. 265. Göteborg, 1995. 113 p. URL: <https://webfiles.portal.chalmers.se/et/PhD/KylanderGunnarPhD.pdf>
10. Петушков, М. Ю. Тепловая модель асинхронного двигателя / М. Ю. Петушков // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Сер. Технические науки. 2011. № 4. С. 48–50.
11. Popova, L. Combined Electromagnetic and Thermal Design Platform for Totally Enclosed Induction Machines: Master's thesis / L. Popova. Lappeenranta University of Technology, 2010. 62 p. URL: <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/63035/nbnfi-fe201006091991.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
12. Пугачев, А. А. Результаты экспериментальных исследований тепловых процессов в асинхронном двигателе / А. А. Пугачев, Д. А. Бондаренко // Вестник Брянского государственного технического университета. 2015. № 3 (47). С. 77–82.
13. Зализный, Д. И. Расчет температур в проводах низковольтных воздушных линий электропередачи / Д. И. Зализный, Г. И. Селиверстов, Д. Г. Крость // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2025. Т. 68, № 4. С. 311–323. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-4-311-323>
14. Пат. RU 2635824 C2, МПК G01R 31/34 (2006.01). Устройство диагностики технического состояния электродвигателя подвижного роботизированного комплекса: № 2016116067: заявлено 25.04.2016: опубл. 16.11.2017 / А. Ю. Бердников, А. И. Гладышев, К. В. Капелько URL: <https://patents.google.com/patent/RU2635824C2/ru>
15. Пат. RU 2772109, МПК H02K 15/12 (2022.02); H04W 24/04 (2022.02). Устройство эксплуатационного контроля нагрева электродвигателей: № 2021107262: заявлено 08.09.2020: опубл. 17.05.2022 / С. В. Волобуев, О. А. Волобуева, А. С. Феклистов, В. А. Петрухин URL: <https://patents.google.com/patent/RU2772109C2/ru>
16. Таранов, Д. М. Тепловые модели электропривода / Д. М. Таранов, А. Е. Чуркин, А. В. Лыткин // Эпоха науки. 2015. № 1. С. 16.
17. Киселев, А. В. Анализ теплового состояния первичного источника электрической энергии забойной телеметрической системы / А. В. Киселев, А. Г. Гарганеев, О. С. Качин // Доклады ТУСУР. 2014. № 4 (34). С. 189–193.
18. Сабденов, К. О. Особенности оптимизационной задачи на подбор материалов для минимизации потери тепла через плоскую стенку / К. О. Сабденов, М. Ерзада // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331, № 6. С. 169–174. <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/6/2686>
19. Постников, И. М. Проектирование электрических машин: учеб. пособие для электротехн. спец. высш. учеб. заведений УССР / И. М. Постников. Киев: Гостехиздат УССР, 1952. 736 с.
20. Секретарев, Ю. А. Модели текущего технического состояния электрооборудования для расчета надежности систем электроснабжения монопотребителей в рамках риск-ориентированного подхода / Ю. А. Секретарев, А. А. Горшунов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2025. Т. 68, № 1. С. 17–34. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-1-17-34>

Поступила 11.08.2025    Подписана в печать 15.12.2025    Опубликована онлайн 31.03.2026

#### REFERENCES

1. Zhezhelanko I. V., Kryvonosov V. E., Vasilenko S. V. (2021) Criteria for Detecting Turn-To-Turn Short Circuit in Stator Windings Using Vector Analysis of Electric Motor Phase Currents. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (3), 202–218 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-202-218>
2. Litzkevich A., Halezin A. (2015) Probabilistic Assessment of Long-Term Resources of the Sea Port Cable Lines on Exposure of Random Changes Temperature. *Transport business of Russia*, (2), 145–149 (in Russian).

3. DUBYAGO M. N., POLUYANOVICH N. K., PSHIKHOPOV V. H. (2017) Method of Investigating Thermal Fluctuation Processes in Problems of Diagnostics and Prediction of Insulating Materials. *Vestnik of Don State Technical University*, 17 (3), 117–127 (in Russian). <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2017-17-3-117-127>
4. BRYAKIN I. V., BOCHKAREV I. V., BAGIYEV H. G., KELEBAEV K. K. (2019) Electric AC Machines Temperature Control and Overheating Protection Using Leakage Currents to Evaluate the Induction Motor Insulation Condition. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 19 (1), 75–84 (in Russian). <https://doi.org/10.14529/power190109>
5. YOUNSI K., NETI P., SHAH M., ZHOU J., KRAHN J., WEEBER K., WHITEFIELD C. (2010) On-line Capacitance and Dissipation Factor Monitoring of AC Stator Insulation. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 17 (5), 1441–1452. <https://doi.org/10.1109/tdei.2010.5595545>
6. STATON D. A., CAVAGNINO A. (2008) Convection Heat Transfer and Flow Calculations Suitable for Electric Machines Thermal Models. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55 (10), 3509–3516. <https://doi.org/10.1109/tie.2008.922604>
7. ZALIZNY D. I., SHIROKOV O. G., POPICHEV V. V. (2015) Adaptive Mathematical Model for Thermal Processes of the Induction Motor with Cage Rotor. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, (1), 31–43 (in Russian).
8. ZIUZEV A., METELKOV V. (2018) Two-Channel Thermodynamic Model of the Induction Motor for the Heat Protection System. *Electrotechnical Systems and Complexes*, 2 (39), 4–11 (in Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2\(39\)-4-119](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2(39)-4-119)
9. KYLANDER G. (1995) *Thermal Modelling of Small Cage Induction Motors. Technical Report No. 265*. Göteborg. 113. Available at: <https://webfiles.portal.chalmers.se/et/PhD/KylanderGunnarPhD.pdf>
10. PETUSHKOV M. YU. (2011) Thermal Model of an Asynchronous Motor. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region. Seriya: Tekhnicheskiiye nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Technical Sciences*, (4), 48–50 (in Russian).
11. POPOVA L. (2010) *Combined Electromagnetic and Thermal Design Platform for Totally Enclosed Induction Machines* [Master's thesis]. Lappeenranta University of Technology. 62. Available at: <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/63035/nbnfi-fe201006091991.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
12. PUGACHEV A. A., BONDARENKO D. A. (2015) Results of Experimental Studies of Thermal Processes in an Asynchronous Motor. *Bulletin of Bryansk State Technical University*, (3), 77–82 (in Russian).
13. ZALIZNY D. I., SELIVERSTOV G. I., KROL D. G. Temperature Calculation in Wires of Low-Voltage Overhead Power Lines. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 68 (4), 311–323 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-4-311-323>
14. BERDNIKOV A. YU., GLADYSHEV A. I., KAPEL'KO K. V. (2017) *Device for Diagnosing the Technical Condition of the Electric Motor of a Mobile Robotic Complex*. Patent RU 2635824 C2 (in Russian).
15. VOLOBUEV S. V., VOLOBUEVA O. A., FEKLISTOV A. S., PETRUHIN V. A. (2022) *Device for Operational Monitoring of Electric Motor Heating*. Patent RU 2772109 (in Russian).
16. TARANOV D. M., CHURKIN A. E., LYTKIN A. V. (2015) Thermal Models of Electric Drive. *Epokha nauki [Epoch of Science]*, (1), 16 (in Russian).
17. KISELEV A. V., GARGANEEV A. G., KACHIN O. S. (2014) A Thermal Condition Analysis of Primary Power Source of a Bottomhole Telemetric System. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki*, (4), 189–193 (in Russian).
18. SABDENOV K. O., ERZADA M. (2020) Features of Optimization Problem for Selecting Materials to Minimize Heat Loss through the Wall. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 331 (6), 169–174 (in Russian). <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/6/2686>
19. POSTNIKOV I. M. (1952) *Designing Electric Machines*. Kiev, Gostekhizdat Publ. 736 (in Russian).
20. SEKRETAREV YU. A., GORSHUNOV A. A. (2025) Models of the Current Technical Condition of Electrical Equipment for Calculating the Reliability of Power Supply Systems for Single-Users within the Framework of a Risk-Based Approach. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 68 (1), 17–34 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-1-17-34>