

УДК 621.396

С. Н. ШАХОВА, магистрант

В. В. ТАРАСОВА, канд. тех. наук, доцент

Харьковский университет воздушных сил имени Ивана Кожедуба, г. Харьков

## О МЕТОДАХ РАСЧЕТА СРЕДНИХ ПРЕВЫШЕНИЙ ТЕМПЕРАТУР ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ

*В статье рассмотрены некоторые аспекты методов расчета превышения температур в электрических двигателях, рассмотрены аналитический и метод расчета по тепловым моделям электрического двигателя, рассмотрена тепловая схема замещения электрического двигателя.*

**Ключевые слова:** тепловая модель электрического двигателя, аналитический метод, превышение температур, схема замещения.

*В статті розглянуті деякі аспекти методів розрахунку перебільшення температур в електричних двигунах, розглянуті аналітичний та метод розрахунку по тепловим моделям електричного двигуна, розглянута теплова схема заміщення електричного двигуна.*

**Ключові слова:** теплова модель електричного двигуна, аналітичний метод, перебільшення температур, схема заміщення.

### Введение

В соответствии с законом Джоуля-Ленца любой элемент, через который протекает электрический ток, нагревается:

$$Q = UIt, \quad (1)$$

где  $Q$  – количество тепла;

$U, I$  – напряжение и ток цепи соответственно;

$t$  – время протекания тока.

Процесс нагревания, как видно из формулы (1), определяется разными факторами. А выделенное количество тепла может при определенных условиях превышать допустимые величины и приводить к негативным последствиям, например, к повреждению изоляции.

Поэтому проведение тепловых расчетов является актуальной задачей.

### Основная часть

Известно [1, 2], что превышение температуры можно рассчитывать различными методами. Однако, чаще всего используют аналитический метод, который дает строгое решение, и метод тепловой модели. Рассмотрим их основные особенности.

### Методы расчета

Аналитические методы расчета позволяют проводить анализ линейных и нелинейных цепей в общем виде, а не для частных значений параметров элементов схемы. В этом заключается их главное преимущество. Однако, при расчете нелинейных цепей, аппроксимация нелинейной характеристики, лежащая в основе данных методов, изначально обуславливает внесение в расчеты большей или меньшей погрешности. Как и при графическом анализе цепей, при применении аналитических методов используются характеристики нелинейных элементов для мгновенных значений, по первым гармоникам и для действующих значений. При этом для расчета цепей переменного тока наиболее широкое распространение получили следующие аналитические методы:

- метод аналитической аппроксимации;
- метод кусочно-линейной аппроксимации;
- метод гармонического баланса;
- метод эквивалентных синусоид (метод расчета по действующим значениям).

В первых трех случаях обычно используются характеристики нелинейных элементов для мгновенных значений. Характеристики нелинейных элементов по первым гармоникам используются при применении частного варианта метода гармонического баланса – метода

расчета по первым гармоникам. В свою очередь метод эквивалентных синусоид основан на применении характеристик нелинейных элементов для действующих значений.

Электрический двигатель (ЭД) представляет собой сложную термодинамическую систему, неоднородную по своим тепловым параметрам, имеющую внутреннее тепловыделение и сложную внутреннюю циркуляцию тепловых потоков. Поэтому в подавляющем большинстве случаев применение аналитических методов для тепловых расчетов ЭД является достаточно сложной задачей.

Расчет средних превышений температур, с достаточной для практики точностью, может, был проведен по тепловой модели ЭД.

#### Тепловые модели

Простейшая тепловая модель электрического двигателя представляет собой однородное в тепловом отношении тело. При использовании этой модели делают следующие допущения:

- электрический двигатель имеет бесконечно большую теплопроводность и, как следствие, одинаковую температуру по всему объему;
- количество теплоты, которым ЭД обменивается с окружающей средой, пропорционально разности температур двигателя и окружающей среды;
- тепловые параметры ЭД и окружающей среды постоянны и не связаны с температурой двигателя (это обстоятельство обеспечивает линейность тепловой модели).

Рассмотрим тепловые процессы в ЭД за элементарный промежуток времени  $dt$ . Тепловая энергия, выделившаяся за это время, равна

$$dQ_1 = \Delta P dt. \quad (2)$$

Часть этой энергии поглощается ЭД и приводит к повышению его температуры

$$dQ_2 = C d\theta, \quad (3)$$

где  $C$  – теплоемкость (Дж/К) ЭД, то есть количество теплоты, необходимое для повышения его температуры на  $1^\circ\text{C}$ ;

$\theta$  – превышение температуры ЭД над температурой окружающей среды.

Другая часть энергии, выделенной в ЭД, отдается в окружающую среду. Эта энергия пропорциональна превышению температуры

$$dQ_3 = A\theta dt, \quad (4)$$

где  $A$  – теплоотдача, Вт/К;

$Q$  – количество теплоты, отдаваемое ЭД в окружающую среду за 1с при разности температур двигателя и окружающей среды в  $1^\circ\text{C}$ .

Анализ теплового состояния ЭД проводится на основании уравнения теплового баланса:

$$dQ_1 - dQ_2 + dQ_3. \quad (5)$$

Согласно уравнению теплового баланса (5), тепловая энергия, выделяемая в ЭД, равна сумме энергии, поглощаемой и отдаваемой в окружающую среду. Учитывая, выражения (2)...(4), уравнение теплового баланса можно записать в виде:

$$\Delta P dt = C d\theta + A\theta dt$$

или:

$$C \frac{d\theta}{dt} + A\theta = \Delta P. \quad (6)$$

При установившемся тепловом режиме производная  $d\theta/dt = 0$  и  $A\theta_y = \Delta P$ .

В установившемся тепловом режиме температура ЭД не меняется и вся тепловая энергия, выделяемая в ЭД, передается в окружающую среду. Установившееся превышение температуры  $\theta_y$  можно найти как отношение полных потерь к теплоотдаче ЭД  $\theta_y = \Delta P/A$ .

Отметим, что теплоотдача ЭД определяет максимальную мощность двигателя в установившемся режиме. Следовательно, для увеличения мощности ЭД необходимо улучшать теплоотдачу в окружающую среду, а именно: увеличивать поверхность охлаждения или применять интенсивное внешнее охлаждение.

**Первая тепловая модель** представляет собой инерционное звено первого порядка с постоянной времени  $\tau_{\theta}$ , которая определяет темп нагрева и охлаждения ЭД. При включении ЭД на постоянную нагрузку установившееся тепловое состояние будет достигнуто через время  $t = (3 \dots 4) \tau_{\theta}$ .

Если предположить, что ЭД нагревается без отдачи энергии в окружающую среду и вся энергия, выделяемая в нем, идет на повышение температуры, то через время  $t = T_{\theta}$  температура ЭД достигает установившегося значения  $\theta_y$ .

Нагрев и охлаждение ЭД зависят от вентиляции и теплообмена с внешней средой. При неподвижном роторе условия вентиляции ухудшаются, и теплоотдача ЭД уменьшается. Отношение теплоотдачи неподвижного ЭД к номинальной теплоотдаче представляет собой коэффициент  $\beta_0$  ухудшения охлаждения.

Изменение условий охлаждения приводит к тому, что постоянные времени нагрева и охлаждения ЭД имеют различное значение. Поскольку постоянная времени обратно пропорциональна теплоотдаче ЭД, можно считать, что постоянная времени охлаждения неподвижного двигателя  $\tau_{\theta} = T_{\theta} / \beta_0$ .

**Вторая тепловая модель.** Представление ЭД в виде однородного в тепловом отношении тела представляет собой достаточно грубое допущение. Более точная модель тепловых процессов может быть получена, если учесть различие в тепловыделении и термодинамических параметрах обмоток и сердечника ЭД.

Таким образом, получается тепловая модель, состоящая из двух тел. Одно тело эквивалентно медным обмоткам ЭД, другое – стальным сердечникам. Для каждого тела тепловой модели справедливы допущения, принятые в первой тепловой модели. Температурное поле стали и меди считают равномерным, а температуру в каждой точке обмоток и сердечников одинаковой.

С физической точки зрения вторая тепловая модель представляет собой два коаксиальных полых цилиндра, теплообмен которых с внешней средой может осуществляться как по наружной, так и внутренней поверхности. Тепловая модель никак не связана с реальной конструкцией ЭД, имеющего несколько обмоток и стальных сердечников. Ее назначение по возможности правильно отразить тепловые процессы, происходящие в электрической машине.

При составлении уравнения теплового баланса для каждого тела необходимо учесть внутреннее тепловыделение, поглощение теплоты, теплообмен с внешней средой и взаимный теплообмен между сталью и медью.

Обозначим тепловые параметры, относящиеся к медным обмоткам, индексом 1, а к стальному сердечнику – индексом 2. Коэффициент теплоотдачи между сталью и медью обозначим  $A_{12}$ . Тогда для тепловой модели, состоящей из двух тел, справедлива система уравнений, определяющая баланс тепловой энергии:

$$\begin{aligned} \Delta P_1 dt + A_{12}(Q_2 - Q_1)dt &= A_1 Q_1 dt + C_1 d\theta_1; \\ \Delta P_2 dt + A_{12}(Q_1 - Q_2)dt &= A_2 \theta_2 dt + C_2 d\theta_2. \end{aligned} \quad (7)$$

Направление теплообмена между сталью и медью зависит от соотношения температур. Система (7) может быть представлена в другой форме:

$$\begin{aligned} \Delta P_1 + A_{12}(\theta_2 + \theta_1) &= A_1 \theta_1 + C_1 \frac{d\theta_1}{dt}; \\ \Delta P_2 + A_{12}(\theta_1 + \theta_2) &= A_2 \theta_2 + C_2 \frac{d\theta_2}{dt}. \end{aligned} \quad (8)$$

Система уравнений (8) является полным математическим описанием второй тепловой модели, позволяющим определить температуру меди и стали ЭД в стационарном и переходном режиме. При этом потери в меди можно принять равными переменным потерям  $\Delta P_1 = \Delta P_m = \Delta P_{\text{прп}}$ , а потери в стали с некоторой погрешностью приравнять к постоянным потерям  $\Delta P_2 = \Delta P_{\text{ст}} = \Delta P_{\text{пост}}$ .

В стационарном режиме производные температуры равны нулю, откуда легко найти установившиеся значения превышения температуры меди и стали:

$$\begin{aligned}\theta_1 &= \frac{(A_2 + A_{12})\Delta P_2 + A_{12}\Delta P_1}{\Delta}, \\ \theta_2 &= \frac{A_{12}\Delta P_1 + (A_1 + A_{12})\Delta P_2}{\Delta},\end{aligned}\quad (9)$$

В режиме холостого хода потери в меди малы:  $\Delta P_1 \approx 0$ , и ЭД нагрет равномерно, следовательно, температуры стали и меди равны  $\theta_1 = \theta_2$ . В двигателях, у которых теплообмен между сталью и медью происходит интенсивно ( $A_{12} \rightarrow \infty$ ), установившиеся значения температуры для меди и стали одинаковы:

$$\theta_1 = \theta_2 = \Delta P_2 / (A_1 + A_2). \quad (10)$$

При тепловых расчетах первостепенное значение имеет определение превышения температуры меди. Именно изоляция обмотки представляет собой слабое звено ЭД, ограничивающее ее нагрузочную способность. Поэтому представляет интерес передаточная функция ЭД по нагреву, в которой входным воздействием являются потери в стали и меди, а выходной величиной – повышение температуры меди. Формулу для превышения температур можно записать в виде:

$$\theta_1(p) = W_1(p)\Delta P_1(p) + W_2(p)\Delta P_2(p), \quad (11)$$

где  $W_1(p)$  – передаточная функция по потерям в меди (переменным потерям),  
 $W_2(p)$  – передаточная функция по потерям в стали (постоянным потерям).

Однако для практических целей в большинстве случаев достаточно знать только среднее превышение температуры. Поэтому сравнительно сложный метод расчета превышения температуры может быть упрощен, и таким образом возникает **метод тепловой схемы замещения**. При данном методе распределения температур в источниках тепла не учитывается, то есть расчет производится по средним температурам источников, для тепловых потоков вводятся соответствующие тепловые сопротивления, и строится тепловая схема замещения.

Полная тепловая схема замещения электрической машины показана на рис.1. Верхняя часть схемы соответствует статору, а нижняя – ротору. Обе части связаны между собой тепловым сопротивлением воздушного зазора  $R_\delta$ .

Чтобы расчет мог быть произведен обычными средствами, рекомендуется выполнять его в два приема. Сперва пренебрегают тепловой проводимостью воздушного зазора ( $R_\delta = \infty$ ) и отдельно рассчитывают превышения температуры статора и ротора. Если оказывается, что между ними имеется большая разность температур, то определяют уравнительный тепловой поток

$$V_{\text{урав}} = (\vartheta_{\text{ст}} - \vartheta_{\text{рот}}) / R_\delta$$

и уменьшают или соответственно увеличивают потери в стали  $V_{\text{ст}}$  и  $V_{\text{рот}}$  на эту величину. Затем повторяют расчет и получают новые температуры, причем разность между температурами стали статора и ротора оказывается значительно меньшей, чем при первом расчете.

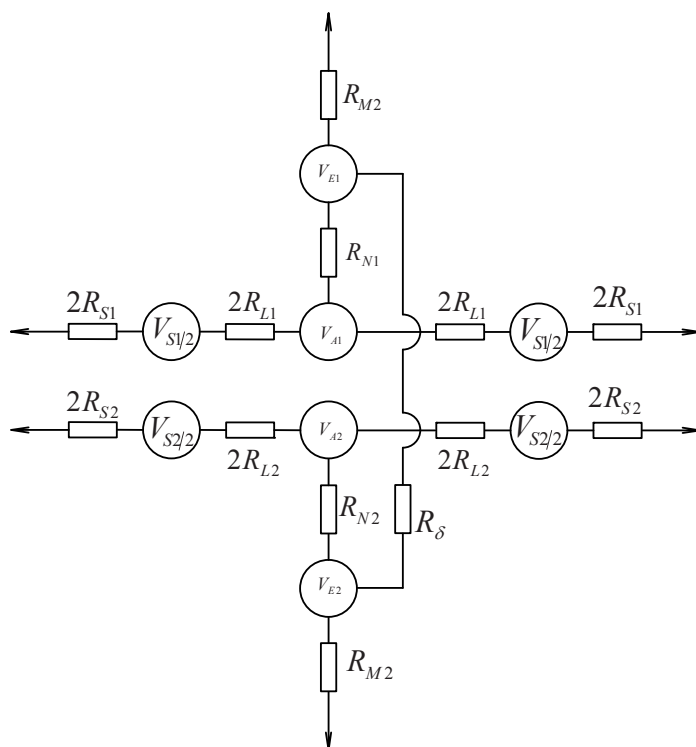


Рис.1. Полная тепловая схема замещения машины переменного тока

**Пример расчета**

В качестве примера произведем расчет нагрева обмотки закрытого электродвигателя с короткозамкнутым ротором и наружным охлаждением. Для этого электродвигателя справедлива тепловая схема замещения, приведенная на рис. 2.

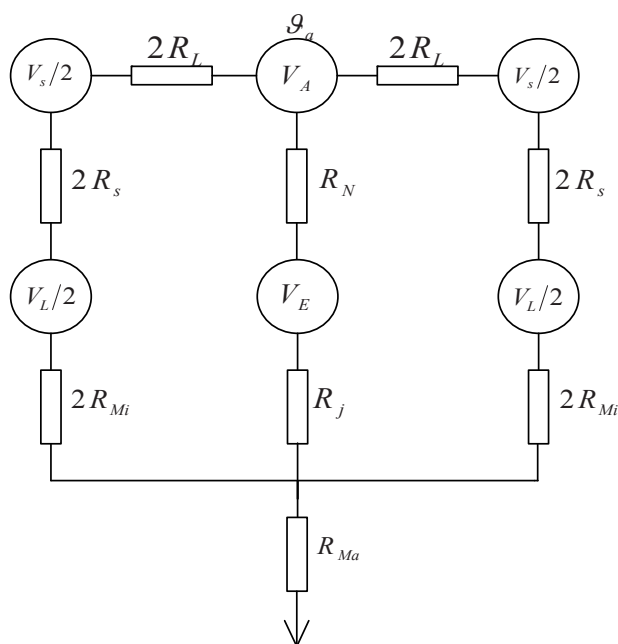


Рис. 2. Тепловая схема замещения закрытой машины с встроенными охлаждающими трубками

Рассчитать вначале величины тепловых сопротивлений. Для выполнения расчетов по данной схеме необходимо.

Тепловое сопротивление  $R_{M\alpha}$  определяется теплоотдачей наружной поверхности кожуха. Обычно большая часть этой поверхности снабжается ребрами. Однако коэффициенты теплоотдачи в различных точках неодинаковы, так как скорость воздуха распределяется вдоль поверхности неравномерно. Лобовая поверхность на стороне, противоположной вентилятору, охлаждается, как правило, хуже, чем лобовая поверхность на стороне вентилятора. Строго говоря, вначале следует определить величины теплопроводности отдельных частей поверхности, а затем определить результирующую теплопроводность. Тепловое сопротивление  $R_{M\alpha}$  определяется в виде обратной величины результирующей теплопроводности.

Таким же образом рассчитывается сопротивление  $R_{M\tau}$ , которое определяется теплоотдачей от внутреннего воздуха на внутреннюю поверхность воздуха. Эта поверхность образуется пространствами, в которых расположены лобовые части. Здесь также коэффициент теплоотдачи поверхности, расположенной на стороне вентилятора, больше, чем для противоположной стороны. Поэтому расчет производится по средней величине для обеих сторон. Температура внутреннего воздуха в различных местах также неодинакова. Для нашего расчета принимаем среднюю величину этой температуры.

Тепловое сопротивление  $R_j$  обуславливается теплопередачей в ярме статора и теплоотдачей между пакетом активной стали и кожухом (корпусом):

$$R_j = \frac{1}{O_{M\alpha}} \left[ \frac{h_j}{\lambda_{Fe}} + \frac{1}{\alpha_{j\delta}} \right],$$

где  $O_{M\alpha}$  – наружная поверхность пакета активной стали.

В закрытых машинах без ребер, но со встроенными охлаждающими трубками, пакет активной стали непосредственно к корпусу не прилегает, и его наружная поверхность также омывается внутренним охлаждающим воздухом. Для этих машин можем принять постоянную температуру внутреннего воздуха, вследствие чего получается тепловая схема замещения, изображенная на рис. 2.

*Тепловые сопротивления  $R_{M\alpha}$  и  $R_{M\tau}$ .* Поверхность всех трубок составляет  $19,7 \text{ м}^2$ , кроме того, сюда добавляется эффективно охлаждаемая лобовая поверхность ( $0,9 \text{ м}^2$ ) и менее эффективно охлаждаемая поверхность ( $5 \text{ м}^2$ ), от которой, однако, в расчет вводится только  $1/5$  часть (но зато с тем же коэффициентом теплоотдачи, что и для других поверхностей). Таким образом, вся поверхность составляет  $O_{M\alpha} = 21,6 \text{ м}^2$ . Скорость воздуха  $v = 15 \text{ м/сек}$ , диаметр трубок  $0,028 \text{ м}$ . Исходя из этого коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{M\alpha} = 3,6 \sqrt{15^3 / 0,028} = 58,5 \text{ Вт/град} \cdot \text{м}^2$ . Эта величина по сравнению с данными, приводимыми в литературе [1, 4] кажется сравнительно не большой, что, вероятно объясняется тем, что при выводе в расчет принималась умеренная турбулентность. Мы, однако, примем  $\alpha_{M\alpha} = 60 \text{ Вт/град} \cdot \text{м}^2$ , так как коэффициент турбулентности известен еще недостаточно хорошо. Кроме того, примем этот же коэффициент теплоотдачи и для внутренних поверхностей, для которых скорость воздуха несколько ниже  $15 \text{ м/сек}$ . Внутренняя эффективная поверхность немного больше наружной, однако примем  $O_{M\tau} = O_{M\alpha}$ , следовательно:

$$R_{M\alpha} = R_{M\tau} = 1 / (21,6 \cdot 60) = 0,77 \cdot 10^{-3} \text{ град/Вт}.$$

*Тепловое сопротивление  $R_N$ .* Периметр изоляционной гильзы равен  $\pi_N = 0,111 \text{ м}$ , длина ее  $0,045 \text{ м}$ , число пазов  $72$ . Отсюда общая поверхность  $O_M = 0,111 \cdot 72 \cdot 0,45 = 3,6 \text{ м}^2$ . Толщина изоляции  $\delta_N = 0,0015 \text{ м}$ , коэффициент теплопроводности  $\lambda_N = 15 \text{ Вт/град} \cdot \text{м}$ , коэффициент теплоотдачи  $\alpha_i = 100 \text{ Вт/град} \cdot \text{м}^2$ . Отсюда получаем:

$$R_N = \frac{1}{3,6} \left( \frac{0,00155}{0,15} + 0,01 \right) = 5,65 \cdot 10^{-3} \text{ град/вт.}$$

Тепловое сопротивление  $R_L$ . Общее сечение меди в одном пазу равно  $q_s = 2,24 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ , длина  $l_A + l_s = 1,2 \text{ м}$ . Отсюда:

$$R_L = \frac{1,2}{12 \cdot 72 \cdot 2,24 \cdot 10^{-4} \cdot 380} = 16,4 \cdot 10^{-3} \text{ град/вт.}$$

Тепловое сопротивление  $R_{SF}$ . Боковая поверхность пакета активной стали равна приблизительно  $0,2 \text{ м}^2$ , общая боковая поверхность всех шести пакетов  $Q_{SF} = 12 \cdot 0,2 = 2,4 \text{ м}^2$ . При длине пакета  $l^i = 0,075 \text{ м}$  и ширине вентиляционных каналов  $l_v = 0,01 \text{ м}$  гидравлический диаметр  $d = 2 \cdot 0,01 = 0,02 \text{ м}$ . Скорость воздуха в вентиляционных каналах принимаем равной  $10 \text{ м/сек}$  и получаем при этом коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{SF} = 3,6 \sqrt{10^4 / 0,02} = 47 \text{ вт/град} \cdot \text{м}^2$ . Для лакированной листовой стали  $\lambda_{\text{ст}} = 4 \text{ вт/град} \cdot \text{м}^2$ . Отсюда получаем:

$$R_{SF} = \frac{1}{2,4} \left( \frac{0,075}{6 \cdot 4} + \frac{1}{47} \right) = 10,2 \cdot 10^{-3} \text{ град/вт}$$

Наружная поверхность пакета активной стали  $Q_{M\text{в}} = 1,06 \text{ м}^2$ , ее коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{M\text{в}} \approx 60 \text{ вт/град} \cdot \text{м}^2$ . Отсюда находим:

$$R_{M\text{в}} = \frac{1}{1,06 \cdot 60} = 15,7 \cdot 10^{-3} \text{ град/вт.}$$

Тепловое сопротивление определяем:

$$R_E = \frac{10,2 + 15,7 \cdot 10^{-3}}{10,2 + 15,7} = 6,1 \cdot 10^{-3} \text{ град/вт.}$$

Тепловое сопротивление  $R_s$ . Периметр одной стороны катушки равен  $0,06 \text{ м}$ , длина лобовых соединений равна  $0,10 \text{ м}$ , толщина изоляции  $\delta_s = 0,001 \text{ м}$ ,  $\lambda_s = 1,5 \text{ вт/град} \cdot \text{м}$ , коэффициент теплоотдачи при скорости воздуха  $10 \text{ м/сек}$  равен  $\alpha_s = 55 \text{ вт/град} \cdot \text{м}^2$ . Отсюда получаем площадь поверхности  $Q_s = 2 \cdot 2 \cdot 72 \cdot 0,06 \cdot 0,75 = 13 \text{ м}^2$ . Вычисляем тепловое сопротивление:

$$R_s = \frac{1}{13} \left( \frac{0,01}{1,5} + \frac{1}{55} \right) = 1,44 \cdot 10^{-3} \text{ град/вт.}$$

Составляющие превышения температуры обмотки равны:

$$\vartheta_A = 28,0; \quad \vartheta_s = 4,9; \quad \vartheta_W = 13,5^\circ\text{C.}$$

Среднее превышение температуры наружного охлаждающего воздуха при количестве его  $K = 1,72 \text{ м}^3/\text{сек}$  и потерях  $V \approx 19000$  Вт. Равно:

$$\vartheta_{\text{н.о}} = \frac{19000}{2 \cdot 1,01 \cdot 1,2 \cdot 1,72} = 4,5^\circ\text{C}.$$

Отсюда получаем среднее превышение температур всей обмотки:

$$\vartheta_{\text{ср}} = 24,7 + 13,5 + 4,5 = 42,7^\circ\text{C}.$$

Как показал анализ литературы [1, 2, 3], многие авторы получали значения превышений температуры в пределах от  $38^\circ\text{C}$  до  $44^\circ\text{C}$ . Это объясняется, вероятно, тем, что в расчете принимались разные коэффициенты теплоотдачи.

### Вывод

В статье рассмотрены некоторые аспекты методов расчета электрических машин. Показано, что расчет температур перегрева по методу тепловых схем замещения имеет достаточное количество преимуществ (в первую очередь – простота и достаточная точность), а значит, метод может быть широко использован в практической деятельности инженера – энергетика.

### Список литературы

1. Касаткин А. С. Электротехника / А. С. Касаткин, М. В. Немцов, М.: Высшая школа, 2000 г.
2. Копылов И. П. Проектирование электрических машин: Учебник для вузов.-3-е изд., и доп. – М.: Высшая школа, 2002 г.
3. Potter, Measurement of Temperature in General-Purpose Squirrel-Gage Induction Motors, Trans. Amer. Inst. Elect. Engross, 58 (1939), 468 с.

## METHODS OF CALCULATION OF AVERAGE OVERHEATING IN ELECTRIC MOTORS

S. N. SHAKHOVA, magistrant  
V.V. TARASOVA, Candidate of Engineering, Associate Professor

*The paper deals with some aspects of the methods for calculation of overheating in electric motors, it considers the analytical method and the method of calculation using eclectic motor thermal models, electric motor heat equivalent circuit.*

**Key words:** *eclectic motor thermal model, analytical method, overheating, equivalent circuit.*

Поступила в редакцию 23.07 2013 г.