

ПРОЦЕССЫ НАГРЕВАНИЯ ОБМОТОК ПРИ ПУСКЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

*Носач Е.В., асс., Черный А.П., д.т.н., проф., Воробейчик О.С., инж.
Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, 39600, г. Кременчуг, Украина
E-mail: evnosach@mail.ru*

Получены уравнения нагревания обмоток в динамических и пусковых режимах электрических машин с самовентиляцией и принудительной вентиляцией при наличии отвода тепла из зазора. Полученные уравнения изменения производительности вентилятора охлаждения в функции температуры могут быть положены в основу построения системы управляемого охлаждения.

Ключевые слова: нагрев обмоток, управляемое охлаждение, тепловые процессы.

Введение. Неустановившиеся тепловые процессы в электрических машинах (ЭМ) характеризуются изменением температуры активной зоны, непостоянством тепловых потоков, несбалансированностью выделяющегося в машине и отводимого окружающей средой количества теплоты. Тепловой расчет ЭМ строят на основе решения задач теплопроводности. Поскольку потери энергии происходят внутри элементов конструкции ЭМ, поле ее температуры является полем с внутренними источниками теплоты, и описывающее это поле уравнение теплопроводности является неоднородным. Наиболее напряженными в тепловом отношении являются динамические режимы и, особенно, режимы пуска. Для самовентилируемых ЭМ вообще процесс нагревания в начальный момент времени будет адиабатным. Для ЭМ с принудительной вентиляцией теплопроводность будет иметь конечное значение, однако также необходимо знать законы изменения температуры обмоток при пуске для проектирования эффективных систем охлаждения.

Анализ предыдущих исследований. Аналитическое решение нестационарных задач является очень громоздким, поэтому при выводе уравнения нагрева, как правило, используют основные допущения классической теории нагревания [1, 2]. Эти допущения используют при тепловых расчетах ЭМ и условно принимают, что нагрев происходит равномерно по всему объему машины, а теплота одинаково рассеивается со всей ее поверхности [3, 4]. Кроме того, основной определяемой величиной является температура и количество входящего и выходящего воздуха, а не температура непосредственно обмоток. Также полагают, что интенсивность охлаждения самовентилируемого двигателя пропорциональна скорости его вращения. Подобные упрощения [3] могут быть допустимы для машин малой мощности и недопустимы для ЭМ большой мощности, режимы работы которых сопровождаются токами в сотни ампер.

В статических режимах работы обмотки нагреты равномерно и в допустимых пределах, а в динамических режимах возможно значительное превышение допустимой температуры [5], что в свою очередь, свидетельствует о необходимости рассмотрения тепловых процессов в различных режимах работы двигателя. Так, в [5, 6] обосновывается необходимость учета тепловых процессов в пусковых ре-

жимах, поскольку они сопровождаются большими токами обмоток двигателей. Широко используемый метод тепловых схем замещения [7–9] имеет ряд существенных недостатков: необходимость детализации схем замещения, невозможность учета временных и температурных зависимостей параметров входящих в схему замещения. Это приводит к тому, что авторы упрощают расчеты [10], теряя, тем самым информацию о температурном состоянии системы в целом.

Существенное влияние на теплопроводность и характер тепловых процессов оказывает поверхность контакта “проводник – изоляция – сталь”. В ряде работ [11, 12] предлагается рассматривать тепловые процессы для меди и стали в отдельности. Это позволяет применять методы интегральной оценки температуры ЭМ используя различные постоянные нагрева и охлаждения.

Цель работы. Вывод уравнения нагрева обмоток электрической машины при заданном законе изменения потерь в обмотке при ее пуске.

Материал и результаты исследования. Будем считать, что при пуске самовентилируемых двигателей теплопроводность практически отсутствует $\lambda = 0$ и имеет место адиабатный процесс. Для ЭМ с принудительной вентиляцией $\lambda \neq 0$, но по причине значительных потерь при пуске скорость нарастания температуры значительно превышает теплоотдачу [2].

Тогда уравнение нагрева будет иметь вид:

$$cG \frac{d\Theta}{dt} = P(t), \quad (1)$$

где c – удельная теплоемкость, G – масса обмоток, $P(t) = I(t)^2 R$ – закон изменения потерь при пуске, $I(t)$ – изменение тока при пуске, R – сопротивление обмоток.

Рассмотрим различные законы изменения тока $I(t)$ двигателя при пуске. Различие в $I(t)$ может быть обосновано наличием токоограничивающих активных сопротивлений, управляемых преобразователей с системой токоограничения и т.п. (рис. 1).

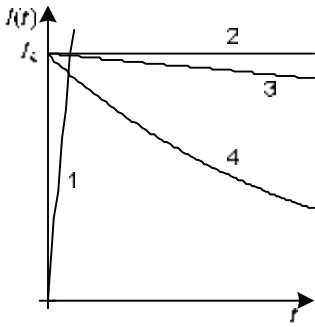


Рисунок 1 – Характер изменения тока при пуске:
1 – линейно возрастающий; 2 – неизменный;
3 – линейно спадающий; 4 – нелинейно спадающий

Например, линейно возрастающий характер изменения тока

$$I(t) = at, \quad (2)$$

где a – коэффициент наклона, соответствует начальному участку кривой $I(t)$ при прямом пуске двигателя; неизменный характер

$$I(t) = I_k = const \quad (3)$$

соответствует начальному участку кривой тока в системе подчиненного регулирования с ПИ-регулятором тока; линейно спадающая характеристика

$$I(t) = I_k - at, \quad (4)$$

где I_k – ток короткого замыкания и нелинейно спадающая характеристика

$$I(t) = I_k e^{-at} \quad (5)$$

также соответствуют определенным процессам.

Решение уравнения (1) для указанных процессов (рис. 1) приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Уравнения нагрева и зависимости изменения температуры обмоток во времени для различных законов изменения тока

Характер тока	Уравнение / Зависимость изменения температуры во времени
(2)	$cG \frac{d\Theta}{dt} = (at)^2 R$
	$\Theta(t) = \frac{R}{3cG} a^2 t^3$
(3)	$cG \frac{d\Theta}{dt} = (I_k)^2 R$
	$\Theta(t) = \frac{R}{cG} I_k^2 t$
(4)	$cG \frac{d\Theta}{dt} = (I_k - at)^2 R$
	$\Theta(t) = \frac{R}{3cGa} (I_k^3 - (I_k - at)^3)$
(5)	$cG \frac{d\Theta}{dt} = (I_k e^{-at})^2 R$
	$\Theta(t) = \frac{I_k^2 R}{2cGa} (1 - I_k e^{-2at})$

Решения в табл. 1 получены без учета изменения температуры обмоток при нагревании. Учтем изменение температуры с использованием известной зависимости:

$$R = R_x (1 + \alpha \Theta(t)), \quad (6)$$

где α – температурный коэффициент, R_x – сопротивление обмоток в холодном состоянии.

Решения уравнения (1) для рассматриваемых процессов (рис. 1) с учетом (6) сведем в табл. 2.

Таблица 2 – Зависимости изменения температуры обмоток во времени с учетом изменения сопротивления при нагревании

Характер тока	Зависимость изменения температуры во времени
(2)	$\Theta(t) = \frac{1}{a} \left(\frac{a a^2 t^3 R_x}{e^3 cG} - 1 \right)$
(3)	$\Theta(t) = \frac{1}{a} \left(\frac{a I_k^2 t R_x}{e^3 cG} - 1 \right)$
(4)	$\Theta(t) = \frac{1}{a} \left(\frac{a R_x}{3cGa} \left(I_k^3 - (I_k - at)^3 \right) - 1 \right)$
(5)	$\Theta(t) = \frac{1}{a} \left(\frac{a I_k^2 R_x}{2cGa} (1 - e^{-2at}) - 1 \right)$

Рассмотрим уравнение нагрева для ЭМ, когда теплопроводность $\lambda \neq 0$. Уравнение нагрева имеет вид:

$$cG \frac{d\Theta}{dt} + \lambda S \Theta(t) = P(t), \quad (7)$$

где S – площадь поверхности обмоток.

Решения уравнения (7) для рассматриваемых процессов (рис. 1) сведем в табл. 3. При этом введем обозначение, что $C = cG$.

Таблица 3 – Зависимости изменения температуры обмоток во времени

Характер тока	Зависимость изменения температуры во времени
(2)	$\Theta(t) = \frac{R_x a^2}{\lambda^3 S^3} \left(\left(2C^2 - 2tC\lambda S + t^2 \lambda^2 S^2 \right) - 2e^{-\frac{\lambda S t}{C}} \frac{1}{C^2} \right)$
(3)	$\Theta(t) = \frac{I_k^2 R_x}{IS} \left(1 - e^{-\frac{IS t}{C}} \right)$

Продолжение табл. 3.

(4)	$\Theta(t) = \frac{R_x \left(2C\lambda SaI_k + 2C^2 a^2 + \lambda^2 S^2 I_k^2 \right)}{\lambda^3 S^3} \times \left(1 - \frac{2\lambda^2 S^2 a t I_k - 2\lambda S a^2 t C + a^2 t^2 \lambda^2 S^2}{2C\lambda SaI_k + 2C^2 a^2 + \lambda^2 S^2 I_k^2} - e^{-\frac{\lambda St}{C}} \right)$
(5)	$\Theta(t) = \frac{I_k^2 R_x}{2aC - \lambda S} \left(1 - e^{-\frac{t(2aC - \lambda S)}{C}} \right) e^{-\frac{\lambda St}{C}}$

Рассмотрим уравнение нагрева для ЭМ с принудительной вентиляцией. С учетом дополнительного отвода тепла системой охлаждения уравнение (7) примет вид:

$$cG \frac{d\Theta}{dt} + I S \Theta(t) + \frac{1 + \beta V}{k_v} = P(t), \quad (8)$$

где V – окружная скорость или скорость охлаждающего потока, β и k_v – коэффициенты.

Решения уравнения (8) для рассматриваемых процессов (рис. 1) сведем в табл. 4.

Полученные зависимости изменения температуры во времени (табл. 4) содержат параметр V – скорость охлаждающего потока, который по сути является производительностью вентилятора системы принудительной вентиляции. Решая уравнения для $\Theta(t)$ относительно V , можно получить закон изменения производительности вентилятора для рассматриваемых процессов (рис. 1) при заданном законе изменения температуры:

$$V = f(\Theta). \quad (9)$$

Таблица 4 – Зависимости изменения температуры обмоток во времени с учетом принудительной вентиляции

Характер тока	Зависимость изменения температуры во времени
(2)	$\Theta(t) = \left(\frac{I}{\lambda S k_v} + \frac{\beta V}{\lambda S k_v} - \frac{2C^2 R_x a^2}{\lambda^3 S^3} \right) \times \left(\frac{a^2 t^2 R_x}{\lambda S} - \frac{2a^2 t R_x C}{\lambda^2 S^2} - 1 + e^{-\frac{\lambda St}{C}} \right)$
(3)	$\Theta(t) = \frac{I_k^2 R_x k_v - \beta V - I}{\lambda S k_v} \left(1 - e^{-\frac{\lambda St}{C}} \right)$

Продолжение табл. 4.

(4)	$\Theta(t) = \left(\frac{I}{\lambda S k_v} + \frac{\beta V}{\lambda S k_v} - \frac{R_x I_k^2}{\lambda S} - \frac{2C R_x I_k a}{\lambda^2 S^2} - \frac{2C^2 R_x a^2}{\lambda^3 S^3} \right) \times \left(\frac{R_x a^2 t^2}{\lambda S} - \frac{2R_x a t I_k}{\lambda S} - \frac{2R_x a^2 t C}{\lambda^2 S^2} - 1 + e^{-\frac{\lambda St}{C}} \right)$
(5)	$\Theta(t) = -\frac{I}{\lambda S k_v} - \frac{\beta V}{\lambda S k_v} - \frac{R_x I_k^2}{2aC - \lambda S} e^{-\frac{1}{C}(\lambda St + t(2aC - \lambda S))} + \left(\frac{I}{\lambda S k_v} + \frac{\beta V}{\lambda S k_v} + \frac{R_x I_k^2}{2aC - \lambda S} \right) e^{-\frac{\lambda St}{C}}$

Результаты решения уравнения (9) приведены в табл. 5.

Таблица 5 – Зависимость изменения производительности вентилятора охлаждения в функции температуры

Характер тока	Зависимость изменения температуры во времени
(2)	$V(t) = \frac{1}{b I^2 S^2} \left(e^{-\frac{I S t}{C}} - 1 \right)^{-1} \times \left(\Theta(t) I^3 S^3 k_v + 2a^2 t R_x C I S k_v - a^2 t^2 R_x I^2 S^2 k_v - I^2 S^2 \left(e^{-\frac{I S t}{C}} - 1 \right) + 2C^2 a^2 R_x k_v \left(e^{-\frac{I S t}{C}} - 1 \right) \right)$
(3)	$V(t) = \frac{\lambda S \Theta(t) k_v + I}{\beta \left(e^{-\frac{\lambda St}{C}} - 1 \right)} + \frac{I_k^2 R_x k_v \left(e^{-\frac{\lambda St}{C}} - 1 \right) - e^{-\frac{\lambda St}{C}}}{\beta \left(e^{-\frac{\lambda St}{C}} - 1 \right)}$

Продолжение табл. 5.

(4)	$V(t) = \frac{1}{bl^2 S^2 \left(e^{-\frac{ISt}{C}} - 1 \right)} \times$ $\times \left(\Theta(t) I^3 S^3 k_v + I^2 S^2 + R_x k_v \times \right.$ $\times \left(2at I_k I^2 S^2 + 2a^2 t C I S - a^2 t^2 I^2 S^2 \right) +$ $+ \left(e^{-\frac{ISt}{C}} - 1 \right) \times \left(R_x I_k^2 I^2 S^2 k_v - I^2 S^2 + \right.$ $\left. \left. + 2CR_x I_k a I S k_v + 2C^2 R_x a^2 k_v \right) \right)$
(5)	$V(t) = \frac{I}{\beta \left(\left(e^{-\frac{\lambda St}{C}} - 1 \right) (2aC - \lambda S) \right)} \times$ $\times \left(\Theta(t) \left(2k_v \lambda SaC - k_v \lambda^2 S^2 \right) + \right.$ $+ (\lambda S - 2aC) \left(e^{-\frac{\lambda St}{C}} - 1 \right) -$ $\left. - R_x I_k^2 k_v \lambda S \left(e^{-\frac{\lambda St}{C}} - e^{-2at} \right) \right)$

Выводы. Полученные уравнения позволяют анализировать процессы нагревания обмоток в динамических и пусковых режимах ЭМ с самовентиляцией и принудительной вентиляцией при наличии отвода тепла из зазора. Полученные уравнения изменения производительности вентилятора охлаждения в функции температуры могут быть положены в основу построения системы управляемого охлаждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Филиппов И.Ф. Теплообмен в электрических машинах: Учеб. пособие для вузов. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. – 256 с.
2. Гуревич Э.И., Рыбин Ю.Л. Переходные тепловые процессы в электрических машинах. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1983. – 216 с.

3. Захаренко В.А. Особенности построения системы управления тепловыми режимами обмоток крупных электрических машин // Вісник КДПУ: Наукові праці КДПУ. – Кременчук, 2003. – Вип. 2 (19). – Т. 2. – С. 107–111.

4. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями: / Учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. – 94 с.

5. Анализ процесса нагревания стержней демпферной обмотки синхронного двигателя шарового подрібнювального млина в пусковых режимах / О.С. Воробейчик, О.П. Чорний, Є.В. Носач // Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» – Харків: НТУ «ХПІ», 2010. – № 28. – С. 440–442.

6. Півняк Г.Г., Кириченко В.І., Кириченко В.В. і ін. Вплив нагрівання на пускові властивості синхронного двигуна // Вісник Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут”. – 2010. – № 28. – С. 417–418.

7. Математична модель для діагностування стану ізоляції працюючої потужної електричної машини за її тепловим портретом / В.В. Грабко, В.В. Грабко // Наукові праці ВНТУ. – 2008. – № 1. – С. 178.

8. Развитие математических моделей тепловых процессов в линейных асинхронных двигателях / Ф.Н. Сарапулов, В.В. Гоман // Электротехника. – 2009. – № 8. – С. 17–22.

9. Гусаров А.А. Эквивалентные динамические тепловые схемы и обобщенный алгоритм решения задач нагрева электрических машин // Наукові праці Донецького національного технічного університету. – 2009. – № 9(158). – С. 77–81.

11. Упрощенная математическая модель нестационарного нагрева и охлаждения обмотки статора асинхронного двигателя / В.Я. Беспалов, Ю.А. Мошинский, В.И. Цуканов // Электричество. – 2003. – № 4. – С. 20–26.

12. Евстифеев В.А., Артеменко А.В., Синенко Р.Г. Определение структуры системы принудительного охлаждения электрических машин // Вісник КДПУ: Наукові праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2002. – Вип. 1(12). – С. 122–125.

13. Евстифеев В.А., Родькин Д.И. Обоснование создания управляемого охлаждения электрических машин систем электропривода // Проблемы создания новых машин и технологий. Научные труды КГПИ. Вып. 1/2000 (8). – Кременчук: КГПИ, 2000. – С. 92–94.

Стаття надійшла 15.02.2011 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.
Родькіним Д.Й.

ПРОЦЕСИ НАГРІВАННЯ ОБМОТОК ПРИ ПУСКУ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

*Носач Є.В., ас., Чорний О.П., д.т.н., проф., Воробейчик О.С., інж.
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, 39600, м. Кременчук, Україна
E-mail: evnosach@mail.ru*

Отримано рівняння нагрівання обмоток у динамічних і пускових режимах електричних машин із самовентиляцією й примусовою вентиляцією за наявності відводу тепла із зазору. Отримані рівняння зміни продуктивності вентилятора охолодження у функції температури можуть бути покладені в основу побудови системи керованого охолодження.

Ключові слова: нагрівання обмоток, кероване охолодження, теплові процеси.

HEATING ACTION OF COIL AT STARTING ELECTRIC MACHINES

*Nosach E., as., Chorniy O., Doc. of Sc. (Tech.), Prof., Vorobeychik O., eng.
Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
vul. Pershotravneva, 20, 39600, Kremenchuk, Ukraine
E-mail: evnosach@mail.ru*

Equalizations of coil heating are got in the dynamic and starting modes of electric machines with self-ventilation and forced-circulation at presence of taking of heat from a gap. The got equalizations of change the productivity of cooling ventilator in the function of temperature can be fixed in basis of construction of controlled cooling system.

Key words: coil heating, controlled cooling, heat processes.