

УПРОЩЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ОБМОТКАХ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В. Н. ГУРНИЦКИЙ

(Рекомендовано научным семинаром электромеханического факультета)

Тепловые процессы, происходящие в обмотках при обтекании их электрическим током, имеют следующие особенности.

Время нагрева и охлаждения обмоток несоизмеримо с временем протекающих в них электромагнитных процессов.

Постоянные времени нагрева и охлаждения не равны между собой.

Тепловые параметры обмотки (удельная теплоемкость, коэффициент теплоотдачи, температурный коэффициент сопротивления проводникового материала обмотки) являются функциями ее температуры. Отдача тепла в окружающее пространство с поверхности обмотки зависит от большего числа факторов: геометрии, размеров и исполнения обмотки, ее температуры, условий охлаждения, теплового контакта с магнитопроводом, наличия других тел на пути теплового потока.

Температура внутри обмотки распределяется неравномерно.

Тепловой режим обмотки значительно зависит от примененных в ней изоляционных материалов.

Такое многообразие тепловых явлений в обмотках электрических аппаратов вынуждало исследователей к созданию различных физических и инженерных методов расчета, применимых лишь в конкретных случаях, имеющих часто большое число громоздких формул, эмпирических коэффициентов, кривых и табл. [Л. 1—6 и др.]. Ниже рассмотрим упрощенный метод расчета тепловых процессов в обмотках электромагнитов постоянного тока, основанный на линеаризации зависимостей их тепловых параметров от температуры.

Уравнение теплового баланса изотермической обмотки для любого момента времени dt , имеющей превышение температуры над температурой окружающей среды τ° , как известно [Л. 7], может быть представлено в виде

$$Pdt = Vcd\tau^\circ + S_k k_T \tau^\circ dt, \quad (1)$$

где P — активная мощность, выделяемая в обмотке в виде тепла;

V — вес обмотки;

c — удельная теплоемкость обмотки;

S_k — расчетная поверхность теплоотдачи обмотки;

k_T — коэффициент теплоотдачи.

Если известна динамическая кривая тока во времени, то тепловая энергия, выделившаяся за любой рассматриваемый малый промежуток времени Δt будет равна

$$P \cdot \Delta t = \left(i_{\text{п}} + \frac{\Delta i}{2} \right)^2 r \cdot \Delta t, \quad (2)$$

где r — активное сопротивление цепи обмотки;

$i_{\text{п}}$ — значение тока в конце интервала времени, предыдущего рассматриваемому;

$\frac{\Delta i}{2}$ — среднее на интервале приращение тока.

Величина активного сопротивления в зависимости от температуры находится по известной зависимости

$$r = r_0 \left[1 + \alpha \left(t_0^\circ + \tau_{\text{п}}^\circ + \frac{\Delta \tau}{2} \right) \right], \quad (3)$$

где r_0 — сопротивление меди обмотки при 0°C (удельное сопротивление обмоточной меди при 0°C равно $1,75 \cdot 10^{-8}$ ом. м);

t_0° — температура окружающей среды;

α — температурный коэффициент сопротивления проводникового материала обмотки, для меди равный $0,00431$ град $^{-1}$;

$\tau_{\text{п}}^\circ$ — превышение температуры обмотки над окружающей в конце интервала времени, предшествующего рассматриваемому.

Тепловая энергия, запасаемая в обмотке благодаря ее теплоемкости, не может быть точно определена, так как вес и удельную теплоемкость различных видов изоляции практически бывает трудно учесть. Однако ясно, что их произведение, дающее теплоемкость изоляции, является пренебрежительно малой величиной по сравнению с теплоемкостью материала обмотки. При неучете теплоемкости изоляции, она создает некоторый запас по нагреву. Если принять во внимание близкую к линейной зависимость удельной теплоемкости меди обмотки от температуры [Л. 8], то первое слагаемое уравнения (1) в конечных разностях (среднее значение на интервале) будет приближенно равно

$$Vc\Delta\tau \approx V_{\text{м}} \Delta\tau \left[c_{\text{м}0} + \beta \left(t_0^\circ + \tau_{\text{п}}^\circ + \frac{\Delta\tau}{2} \right) \right], \quad (4)$$

где $V_{\text{м}}$ — вес меди обмотки;

$c_{\text{м}0}$ — удельная теплоемкость меди при температуре 0°C равная $3,85 \cdot 10^{-4} \frac{\text{вт. сек.}}{\text{кг. град.}}$;

β — температурный коэффициент теплоемкости, равный для меди [Л. 8] $1,47 \cdot 10^{-7} \frac{\text{вт. сек.}}{\text{кг. град}^2}$;

$\frac{\Delta\tau}{2}$ — среднее на интервале приращение превышения температуры.

Расчетная поверхность теплоотдачи обмотки находится по формуле [Л. 7].

$$S_{\text{к}} = S_{\text{D}} + \eta_{\text{т}} \cdot S_{\text{д}},$$

где: S_{D} — площадь наружной поверхности обмотки;

$S_{\text{д}}$ — площадь внутренней поверхности обмотки;

$\eta_{\text{т}}$ — коэффициент эффективности теплоотдачи с внутренней поверхности обмотки, равный [Л. 4]:

0,9 — для бескаркасных обмоток,

1,7 — для обмоток с металлическим каркасом,

2,4 — для обмоток, непосредственно наматываемых на сердечник электромагнита.

В ходе тепловых расчетов обмоток с наибольшими затруднениями сталкиваются при определении коэффициентов теплоотдачи с их поверхностями.

Однако эта зависимость близка к линейной, тогда

$$k_{\tau} + k_{\tau_0} + \gamma \left(t_1^{\circ} + \tau_{\pi}^{\circ} + \frac{\Delta\tau^{\circ}}{2} \right), \quad (6)$$

где: k_{τ_0} — коэффициент теплоотдачи обмотки, зависящий от величины ее поверхности, равный [Л. 7] при $1 \text{ см}^2 < S_{\kappa} < 100 \text{ см}^2$

$$k_{\tau_0} = 6 \cdot 10^{-7} \frac{1}{\sqrt[3]{S_{\kappa}}} \frac{\text{вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}, \quad (7)$$

при $100 \text{ см}^2 < S_{\kappa} < 5000 \text{ см}^2$

$$k_{\tau_0} = 3 \cdot 10^{-7} \frac{1}{\sqrt[5]{S_{\kappa}}} \frac{\text{вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}, \quad (8)$$

γ — температурный коэффициент теплоотдачи.

Как свидетельствуют литературные источники [Л. 6, 7, 9—11 и др.], а также некоторые опыты проведенные автором, коэффициент γ изменяется примерно в пределах $\gamma = 5 \cdot 10^{-10}$.

$$\gamma = (4 \div 6) \cdot 10^{-10} \frac{\text{вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}^2}.$$

Если никаких дополнительных сведений о коэффициенте γ нет, то при расчетах следует принять $\gamma = 5 \cdot 10^{-10}$.

Подставим в уравнение (1) значения его членов, тогда получим.

$$\begin{aligned} & \left(i_{\pi} + \frac{\Delta i}{2} \right)^2 r_0 \left[1 + 4,31 \cdot 10^{-3} \left(t_0^{\circ} + \tau_{\pi}^{\circ} + \frac{\Delta t^{\circ}}{2} \right) \right] \Delta t = \\ & = B_{\text{м}} \Delta\tau^{\circ} \left[3,85 \cdot 10^{-4} + 1,47 \cdot 10^{-7} \left(t_0^{\circ} + \tau_{\pi}^{\circ} + \frac{\Delta\tau^{\circ}}{2} \right) \right] + \\ & + S_{\kappa} \left[k_{\tau_0} + 5 \cdot 10^{-10} \left(t_0^{\circ} + \tau_{\pi}^{\circ} + \frac{\Delta\tau^{\circ}}{2} \right) \right] \cdot \left(\tau_{\pi}^{\circ} + \frac{\Delta\tau^{\circ}}{2} \right) \cdot \Delta t. \end{aligned} \quad (9)$$

Решим последнее уравнение относительно приращения превышения температуры обмотки

$$\Delta\tau^{\circ} = \frac{\sqrt{Y^2 - 4KZ} - Y}{X}, \quad (10)$$

где обозначены

$$X = 2 \cdot 1,47 \cdot 10^{-7} B_{\text{м}} + 5 \cdot 10^{-10} S_{\kappa} \cdot \Delta t, \quad (11)$$

$$\begin{aligned} Y = & 2B_{\text{м}} [3,85 \cdot 10^{-4} + 1,47 \cdot 10^{-7} (t_0^{\circ} + \tau_{\pi}^{\circ})] + \\ & + S_{\kappa} [k_{\tau_0} + 5 \cdot 10^{-10} (t_0^{\circ} + 2\tau_{\pi}^{\circ})] \cdot \Delta t - \\ & - 4,31 \cdot 10^{-3} \left(i_{\pi} + \frac{\Delta i}{2} \right)^2 r_0 \cdot \Delta t, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} Z = & S_{\kappa} \tau_{\pi} [k_{\tau_0} + 5 \cdot 10^{-10} (t_0^{\circ} + \tau_{\pi}^{\circ})] \cdot \Delta t - \\ & - \left(i_{\pi} + \frac{\Delta i}{2} \right)^2 r_0 [1 + 4,31 \cdot 10^{-3} (t_0^{\circ} + \tau_{\pi}^{\circ})] \cdot \Delta t. \end{aligned} \quad (13)$$

Таким образом, имея динамическую кривую тока, можно, используя уравнение (10), построить по интервалам кривую превышения температуры обмотки.

Уравнение (1) предполагает обмотку изотермической, поэтому все расчетные формулы справедливы для температуры наружной поверхности реальной обмотки. А так как перепад температур наиболее нагретого слоя обмотки и наружной ее поверхности не превышает 15°C [Л. 12], то можно считать, что допустимая температура нагрева, изоляции обмотки, определяемая ее классом и потребным сроком службы

$$\tau_{\text{доп}}^{\circ} \geq \tau^{\circ} + 15^{\circ}\text{C}. \quad (14)$$

При построениях кривых охлаждения в формулах нужно полагать

$$\left(i_{\text{п}} + \frac{\Delta i}{2} \right) = 0.$$

Изложенный метод был проверен при расчете тепловых процессов в обмотках Ш-образных электромагнитов с поперечно движущимся якорем, являющихся элементами линейного электромагнитного двигателя [Л. 13]. Температура обмотки замерялась методом сопротивления. Сравнение расчетных и экспериментальных характеристик нагрева и охлаждения обмоток 3-х образцов электромагнитов, работавших в длительном и повторно-кратковременном режимах при различных ПВ% указывает на возможность использования метода при тепловых расчетах.

Выводы

1. Предложенный упрощенный метод расчета тепловых процессов в обмотках электромагнитов постоянного тока дает возможность простым способом по динамической характеристике или диаграмме тока найти, зная лишь размеры и не имея почти никаких сведений об исполнении обмотки, построить характеристики ее нагрева и охлаждения.
2. Метод дает удовлетворительные результаты как при расчете повторно-кратковременных, так и длительных режимов обтекания током обмоток электромагнитов.
3. Коэффициент β при малых превышениях температуры незначительно влияет на тепловые характеристики обмотки и может быть принят равным нулю.
4. При корректировке значений коэффициентов γ для конкретных исполнений обмотки, точность расчетов может быть повышена.
5. В случае алюминиевой обмотки коэффициенты α и β должны быть пересчитаны для обмоточного алюминия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Т. Третьяк, Н. Е. Лысов. Основы тепловых расчетов электрической аппаратуры, ОНТИ, 1935.
2. Р. Л. Аронов. Методы расчетов тепловых процессов в активных материалах электромеханических конструкций, ГОНТИ, 1938.
3. А. Я. Буйлов. Основы электроаппаратостроения, ГЭИ, 1946.
4. М. Г. Кобленц. Определение перегрева катушек контакторов постоянного тока. Вестник электропромышленности № 7, 1947.
5. Ф. А. Ступель. Электромеханические реле, Изд. ХГУ, 1956.
6. М. И. Витенберг. Определение нагрева обмоток электромагнитных реле, Автоматика и телемеханика т. XIX, № 11, 1958.
7. А. В. Гордон, А. Г. Сливинская. Электромагниты постоянного тока, ГЭИ, 1960.
8. Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков, Б. М. Тареев. Электротехнические материалы, ГЭИ, 1961.
9. Я. Л. Нейфельд. Методика и номограммы для расчета катушек постоянного тока, Вестник электропромышленности № 5, 1960.

10. Г. Ротерс. Электромагнитные механизмы, ГЭИ, 1949.
 11. С. П. Колосов. О выборе величины перегрева обмоток электромагнитов постоянного тока, Вестник электропромышленности № 11, 1952.
 12. М. А. Любчик. Определение максимальной температуры нагрева катушек электрических аппаратов, Вестник электропромышленности № 11, 1959.
 13. А. И. Зайцев, В. Н. Гурницкий. Разработка тихоходного линейного привода, Тезисы докладов третьей научно-технической конференции по вопросам автоматизации производства, Томск, 1964.
-