

УДК 621.313.333

Е.А. Вареник, М.М. Федоров, А.А. Ткаченко

ТЕПЛОВЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ПЕРИОДИЧНО ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ НАГРУЗКЕ

Аналитические выражения динамики тепловых процессов в элементах электрических машин, работающих с периодически изменяющейся нагрузкой, на любом интервале времени.

Постановка проблемы. Повторно-кратковременный и перемежающийся режимы работы электрических машин характеризуются периодическими повторениями нагрузок. Закон изменения температуры элементов их конструкции в течение цикла определяется диаграммой нагрузки. При многократном повторении циклов нагружения в электрической машине имеет место квазиустановившееся состояние, когда в течение цикла температура элементов машины изменяется по определенному закону $\theta(t)$, который повторяется в последующих циклах. В качестве примера на рисунке 1 приведена зависимость температуры $\theta(t)$ лобовой части обмотки статора асинхронного двигателя (АД) типа КО-11-6 в квазиустановившемся состоянии.

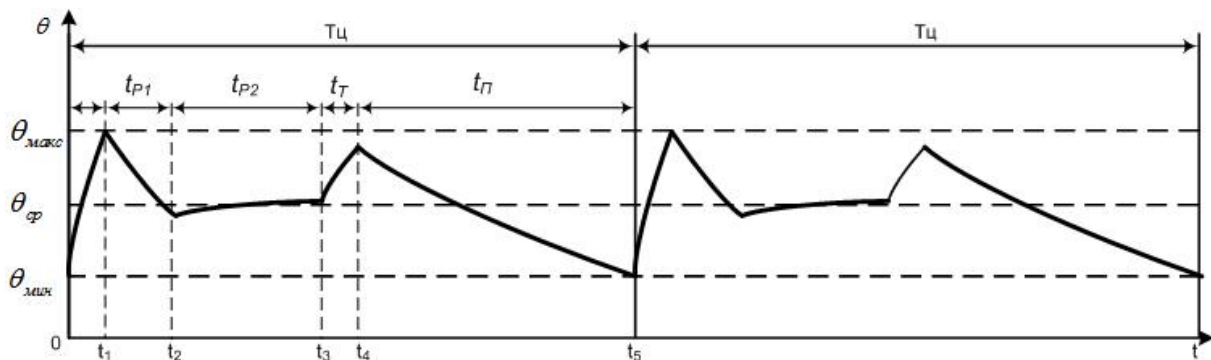


Рисунок 1 – График зависимости изменения температуры лобовой части обмотки статора асинхронного двигателя КО-11-6 в квазиустановившемся состоянии

Из рисунка 1 следует, что цикл имеет пять интервалов. На промежутке времени t_n происходит пуск АД, сопровождающийся повышением тем-

пературы до максимального значения. Затем в течение времени t_{p1} он работает с некоторой постоянной нагрузкой, температура θ лобовой части обмотки статора снижается. В момент времени t_2 происходит увеличение нагрузки, в течение времени t_{p2} температура возрастает. Затем АД работает в режиме торможения на промежутке времени t_T , после чего следует пауза t_n , после чего цикл повторяется.

Количественными характеристиками цикла являются: максимальная θ_{\max} , минимальная θ_{\min} и средняя θ_{cp} температура в цикле, температура в начале любого k -го интервала $\theta_K(0)$, частота повторения циклов, допустимое число включений и т.п. В общем случае цикл включает m интервалов, характеризующихся мощностью источников тепла (потерь в элементах конструкции) и условиями теплоотвода.

Наиболее уязвимым элементом конструкции АД являются изоляционные материалы обмоток. В повторно-кратковременных режимах работы при достижении квазиустановившегося состояния температура изоляционных материалов достигает наибольших значений. Однако превышение температурой максимально допустимых значений может наступить и до наступления квазиустановившегося состояния. В связи с этим вопрос оценки тепловых переходных процессов в различных рабочих циклах является актуальным.

Анализ публикаций. Тепловые переходные процессы в АД описываются системой уравнений на основе его представления в виде отдельных узлов [1]. Это позволяет производить оценку теплового состояния различных элементов конструкции АД в повторно-кратковременных режимах [2, 3]. Известны работы и результаты расчетов тепловых переходных процессов в квазиустановившемся состоянии [4]. Однако методы расчета и оценки тепловых процессов при произвольном характере нагрузки в каждом цикле отсутствуют. В этой связи рассмотрение методов анализа тепловых процессов в элементах конструкции АД в каждом рабочем цикле является актуальной задачей.

Цель статьи. Разработка методики расчета характеристик теплового состояния элементов конструкции электрических машин в каждом рабочем цикле.

Результаты исследований. Эффективность расчета и анализа тепловых переходных процессов на любом интервале при периодически изменяющейся нагрузке можно повысить, используя прием представления кривых $\theta(t)$ в виде суммы принужденной $\theta_{np}(t)$ и свободной $\theta_{св}(t)$ составляющих:

$$\theta = \theta_{np} + \theta_{св}. \quad (1)$$

Принужденной составляющей следует считать кривые $\theta(t)$, описывающие квазиустановившееся состояние, а кривые свободной составляющей

представляют собой огибающую минимальной температуры циклов $\theta_{\min}(t)$ (рисунок 2). Подобный подход обеспечивает упрощение вычислительных операций и удобство анализа качественных и количественных характеристик тепловых переходных процессов. При использовании данного метода имеет место некоторые отклонения форм кривых на интервалах в начальных циклах. Однако по мере увеличения номера цикла, эти отклонения уменьшаются и в квазиустановившемся режиме имеет место полное совпадение кривых.

Методы расчета квазиустановившегося состояния были подробно рассмотрены ранее. Представление свободной составляющей в виде огибающей $\theta_{\min}(t)$ и получение ее аналитического выражения традиционными методами путем решения уравнения состояния нуждается в предварительном обосновании и разработке метода расчета.

В общем случае система уравнений состояния для получения огибающей $\theta_{\theta}(t)$ минимальной температуры цикла $\theta_{\min}(t)$ для различных узлов электрических машин в матричной форме имеет вид

$$C \cdot \frac{d\theta_{\theta}}{dt} + \lambda_{\theta} \cdot \theta_{\theta} = P_{\theta}, \quad (2)$$

где $\lambda_{\theta} = (\lambda_{\theta ij})$ – матрица эквивалентных теплопроводностей (ЭТС);

$P_{\theta} = (P_{\theta 1}, \dots, P_{\theta n})$ – вектор эквивалентных потерь.

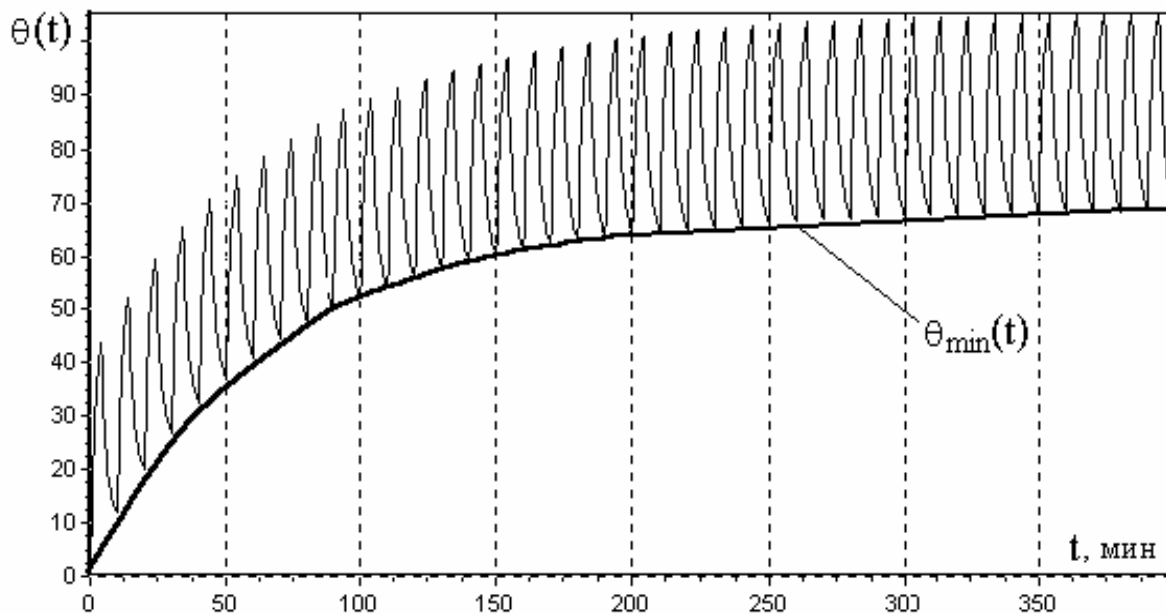


Рисунок 2 – Зависимость $\theta(t)$ с выделенной огибающей $\theta_{\min}(t)$

Значения элементов $\lambda_{\theta ij}$ матрицы ЭТС можно получить на основе постоянства соотношений физических величин, определяемых законом

Фурье для участков цепи ЭТС в квазиустановившемся состоянии.

Тепловая энергия, передаваемая от i -го тела ЭТС к j -му через эквивалентную теплопроводность $\lambda_{\ominus ij}$ за время цикла t_y , в квазиустановившемся состоянии должна быть равна суммарной тепловой энергии, передаваемой на всех n интервалах цикла этого участка

$$\lambda_{\ominus ij} \cdot \int_0^{t_y} (\theta_i - \theta_j) \cdot dt = \sum_{k=1}^n \lambda_{k ij} \cdot \int_{t_k}^{t_{k+1}} (\theta_{ki} - \theta_{kj}) \cdot dt, \quad (3)$$

где $\lambda_{\ominus ij} \cdot \int_0^{t_y} (\theta_i - \theta_j) \cdot dt$ – тепловая энергия, передаваемая через эквивалентную теплопроводность $\lambda_{\ominus ij}$ за время цикла t_y квазиустановившегося состояния;

$$\lambda_{k ij} \cdot \int_{t_k}^{t_{k+1}} (\theta_{ki} - \theta_{kj}) \cdot dt \quad \text{– тепловая энергия, передаваемая через теплопроводность } \lambda_{k ij} \text{ на } k\text{-м интервале цикла;}$$

$\lambda_{k ij}$ – теплопроводность на k -м интервале цикла;

$(\theta_{ki} - \theta_{kj})$ – разность температуры между i -м и j -м телами ЭТС на k -м интервале;

$\lambda_{k ij}$ – тепловая проводимость на k -м интервале.

При этом
$$\int_0^{t_y} (\theta_i - \theta_j) \cdot dt = \sum_{k=1}^n \int_{t_k}^{t_{k+1}} (\theta_{ki} - \theta_{kj}) \cdot dt. \quad (4)$$

Величина $\lambda_{\ominus ij}$ определяется выражением

$$\lambda_{\ominus ij} = \frac{\sum_{k=1}^n \lambda_{k ij} \cdot \int_{t_k}^{t_{k+1}} (\theta_{ki} - \theta_{kj}) \cdot dt}{\sum_{k=1}^m \int_{t_k}^{t_{k+1}} (\theta_{ki} - \theta_{kj}) \cdot dt}. \quad (5)$$

В случае, если изменения температуры в узлах ЭТС на любом k -м интервале в квазиустановившемся состоянии можно аппроксимировать прямыми, выражение (5) примет вид:

$$\lambda_{\ominus ij} = \frac{\sum \lambda_{k ij} \cdot \Delta\theta_{k ij \text{ ср}} \cdot \Delta t_k}{\Delta\theta_{\text{ср } ij} \cdot t_y}, \quad (6)$$

где $\Delta\theta_{\text{ср } ij}$ – средняя разница температуры на k -м интервале цикла;

$\Delta t_k = t_{k+1} - t_k$ – длительность k -го интервала;

$$\Delta\theta_{\text{ср } ij} = \frac{\sum \Delta\theta_{k ij \text{ ср}}}{n} \quad - \quad \text{средняя разница температуры в цикле.}$$

Элементы $P_{\text{э}i}$ вектора эквивалентных потерь можно определить из уравнения состояния (1) для принужденного режима, если $d\theta_{\text{э}}/dt = 0$, а принужденные составляющие $\theta_{\text{э пр}}$ эквивалентной температуры равны минимальной температуре цикла $\theta_{\text{э пр}} = \theta_{\text{min}}$. Тогда уравнение для определения вектора $P_{\text{э}}$ в матричной форме примет вид: $\lambda_{\text{э}} \cdot \theta_{\text{min}} = P_{\text{э}}$; здесь $\theta_{\text{min}} = (\theta_{\text{min}1}, \dots, \theta_{\text{min}2})$ – вектор минимальной температуры тел ЭТС в цикле при квазиустановившемся состоянии.

Вывод. Формулы (2 – 6), а также методика расчета квазиустановившегося состояния, изложенная в [4], позволяют с помощью аналитических выражений судить о динамике тепловых процессов в элементах электрических машин, работающих с периодически изменяющейся нагрузкой, на любом интервале времени.

Список литературы

1. Федоров М.М. Моделирование теплового состояния узлов электрических машин в различных режимах / М.М.Федоров // Зб. наук. праць ДонДТУ. Сер. «Проблеми моделювання та автоматизації проектування динамічних систем». – Донецьк:ДонДТУ, 1999. - Вип. 10. - С. 90-95.
2. Федоров М.М. Контроль температурного состояния обмоток асинхронного двигателя в повторно-кратковременном режиме работы / М.М.Федоров, В.Ф.Денник, Д.М.Малеев // Сб. науч.тр. ДонГТУ. Сер. «Электротехника и энергетика». – Донецк:ДонГТУ, 1999. - Вып. 4. - С. 127-130.
3. Федоров М.М. Моделирование динамики теплового состояния электрических машин при повторно-кратковременных режимах работы /М.М.Федоров// Техническая электродинамика. – 2000. - №4. - С. 38-42.
4. Вареник Е.А. Оценка теплового состояния электрических машин в нестационарных режимах работы / Е.А.Вареник, М.М.Федоров, В.Е.Михайлов // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2008. – С. 96-102.