

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МАССИВНОМ РОТОРЕ ШНЕКОВОГО ЭЛЕКТРОТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭНЕРГИИ

Заблодский Н.Н., к.т.н., доц., Овчаров А.А., Филатов М.А.

Донбасский государственный технический университет

Украина, 94204, Алчевск, Луганской обл., пр. Ленина, 16, ДонГТУ, каф. "Электрические машины и аппараты"
тел. (06442) 2-05-64, факс (06442) 2-68-87, e-mail: info@dgmi.edu.ua

Наведені результати теоретичних досліджень, отримані залежності розподілу електричної напруженості вихрових струмів на поверхні масивного ротора ЕТМП, встановлені закономірності розподілу теплового поля.

Приведены результаты теоретических исследований, получены зависимости распределения электрической напряженности вихревых токов на поверхности массивного ротора ЭТМП, установлены закономерности распределения теплового поля.

ВВЕДЕНИЕ

Массивный ротор шнекового электротепломеханического преобразователя (ЭТМП) – один из самых нагруженных узлов системы преобразования энергии, поскольку он наделен полифункциональными свойствами и непосредственно воспринимает нагрузки технологической среды [1, 2]. В известных публикациях, посвященных электрическим машинам с массивными ротором не представлены исследования процессов распределения удельных мощностей и температурного поля внешнего массивного ротора многомодульной системы и взаимодействие со средой охлаждения, обладающей, в общем случае, различными реологическими свойствами вдоль ротора [3, 4]. Вместе с тем, расчет и проектирование ЭТМП невозможен без оценки конкретного распределения вихревых токов, удельных мощностей и температур как по толщине, так и вдоль оси массивного ротора, включая между-модульную область.

Целью настоящей работы является экспериментальное определение картины распределения вихревых токов, удельной мощности и температурного поля в массивном роторе шнекового ЭТМП.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальное определение картины распределения вихревых токов, удельной мощности и температурного поля в массивном роторе шнекового ЭТМП.

На основании закона электромагнитной индукции можно записать $\oint E \cdot dl = \omega_2 \cdot \Phi_{1m}$, т.е. интеграл напряженности электрического поля на поверхности массивного ротора вдоль контура, взятого вдоль линии тока, охватывающего весь поток взаимоиндукции (диаметрального контура), определяется однозначно через поток взаимоиндукции Φ_{1m} и электрическую частоту $\omega_2 = \omega_1 \cdot s$. При этом интеграл может быть заменен суммой интегралов по контуру:

$$\oint E \cdot dl = 2 \cdot \left(\int_{l_a} E \cdot dl + \int_{l_t} E \cdot dl \right) = 2 \cdot (E_a \cdot l_a + E_t \cdot l_t), \quad (1)$$

где E_a - средняя напряженность электрического поля на поверхности вдоль активной длины; E_t - среднее значение E на поверхности торца вдоль линии тока; l_a, l_t - соответственно длина активной и торцевой частей ротора.

Входящие в (1) значения E_a и E_t являются

мгновенными значениями периодических функций \dot{E}_a и \dot{E}_t , которые в общем случае не совпадают по фазе. Если воспользоваться результатами численного расчета поля либо экспериментальными данными, методика [3] дает возможность вести довольно точные расчеты параметров тока массивного ротора. В данной работе экспериментальная оценка распределения вихревых токов и определение напряженности электрического поля на поверхности массивного ротора выполнена на натурном образце шнекового ЭТМП с применением потенциальных зондов. Измерения выполнены в квазиустановившемся тепловом режиме при неподвижном роторе.

На рис. 1 представлена схема расположения потенциальных зондов и термопар на массивном роторе шнекового ЭТМП.

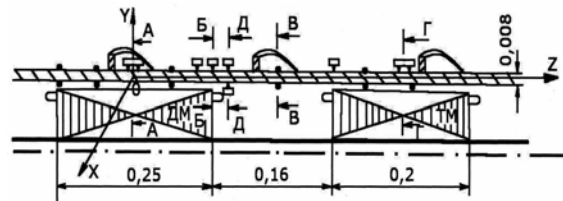


Рис. 1. Схема расположения датчиков на массивном роторе

Расстояние между игольчатыми электродами потенциального зонда составляло $d = 10$ мм. Напряженность электрического поля контура вихревых токов на поверхности ротора определяется выражением $E = U/d$, где U - напряжение, измеряемое милливольтметром. Результаты измерений напряженности электрического поля вихревых токов представлены на рис. 2 и 3. Начало координатной системы условно привязано к середине полюсного деления в среднем сечении толщи массивного ротора.

Ориентация игольчатых электродов при измерениях следующая: измерение аксиальной составляющей напряженности E_a - оба электрода установлены вдоль оси Z; измерение тангенциальной составляющей E_t - оба электрода установлены вдоль оси X. Опрос измерительных каналов происходил с периодичностью, определяемой угловой частотой вращающегося магнитного поля статора.

Результаты измерений напряженности электрического поля вихревых токов ротора использованы для построения картины мгновенного распределения вихревых токов на поверхности массивного ротора (рис. 4).

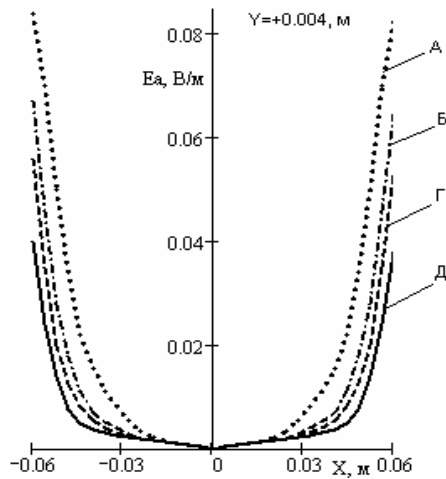


Рис. 2. Распределение аксиальной составляющей электрической напряженности

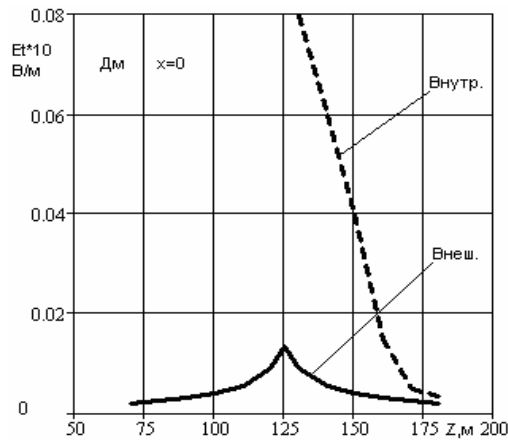


Рис. 3. Распределение тангенциальной составляющей электрической напряженности

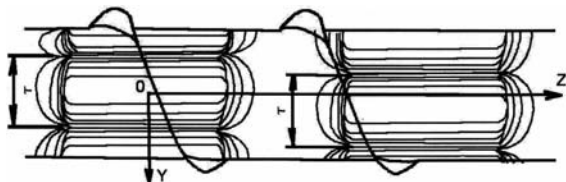


Рис. 4. Распределение вихревых токов в поверхностном слое ротора шнекового ЭТМП

Анализ кривых указывает на неравномерность мгновенного распределения вихревых токов по длине ротора и в пределах полюсного деления, а так же на существенное увеличение плотности вихревых токов в области торцов пакетов статоров двигательного (ДМ) и тормозного (ТМ) модулей. Однако достаточно высокая скорость вращения магнитного поля и инерционность тепловых процессов обеспечивает равномерность температурного поля на поверхности в пределах активных зон статоров. Контрольный осмотр ротора экспериментального образца ЭТМП показал наличие в областях ротора, располагающихся против торцов пакетов статоров, узких кольцевых зон с цветами побежалости металла (усиленный нагрев) более яркими, чем в активной зоне.

Ввиду малости воздушного зазора ЭТМП возможность регистрации E на внутренней поверхности ротора имела только для торцевых областей. Из рис. 3 следует, что максимальные значения тангенциальных составляющих E_t на внешней и внутренней поверхностях ротора отличаются примерно в 10 раз. Следует отметить и тот факт, что контуры вихревых токов заре-

гистрированы на внешней поверхности ротора, т.е. на глубине 8 мм от поверхности с максимальным значением напряженности магнитного поля, что превышает расчетные значения глубины проникновения на частоте $f = 50$ Гц, полученные по известным методикам расчета. Полученные результаты совпадают с результатами моделирования плотности вихревого тока по глубине ротора, проведенного с использованием обобщенной математической модели [5].

При измерении характеристик весьма сложных процессов, каковым является электротепломеханическое преобразование энергии, для получения результатов высокой достоверности целесообразно производить своеобразное дублирование результатов, полученных иным способом. В частности, удельные потери на поверхности или в элементарном объеме, определяемые через электромагнитные характеристики, логично дублировать результатами измерений тепловых процессов. В данной работе применен термометрический метод для измерения местных потерь.

Мы рассматриваем изменение температур в отдельных точках поверхности ротора, начиная с момента внезапного возникновения объемного тепловыделения $q_v(x, y, z)$, которое, в общем случае, может меняться в ходе нагрева. Условия теплообмена на граничных поверхностях ротора неизменны во времени. Граничные условия определяются уравнением теплового баланса, согласно которому количество теплоты q_λ , подведенное к единице поверхности посредством теплопроводности, уравновешено удельным тепловым потоком q_α , снимаемым конвективным путем с единицы поверхности, охлаждающей средой:

$$\frac{-\partial T_f}{\partial n} = \frac{\alpha}{\lambda} \cdot (T_f - T_0), \quad (2)$$

где T_f, T_0 - соответственно температура в точке измерения и температура охлаждающей среды; α, λ - коэффициенты теплоотдачи и теплопроводности материала ротора соответственно.

Процесс взаимосвязи теплового потока и температуры в роторе может быть описан неоднородным дифференциальным уравнением:

$$C \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = q_v + \lambda_x \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \quad (3)$$

где C - удельная теплоемкость материала ротора, Дж/(кг К), ρ - плотность, кг/м³.

В момент времени $t = 0$ (момент включения ЭТМП) ротор находится в состоянии теплового равновесия с охлаждающей средой и уравнение (3) выглядит следующим образом:

$$C \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{t=0} = q_v(x, y, z). \quad (4)$$

Таким образом, рассматривая процесс, как адиабатический, удельное тепловыделение в любой точке ротора находим экспериментально по начальной скорости нарастания температуры при внезапном включении ЭТМП.

Сохранение адиабатного режима нагрева, безусловно, может быть обеспечено только в промежутки времени, очень близкий к моменту включения. Однако наличие большой индуктивности в ЭТМП не позволяет создавать скачкообразные импульсы тепловыделения. Поэтому выбор расчетного участка кривой нагрева в конкретной точке поверхности ротора должен определяться погрешностью начального уча-

стка кривой, куда, впрочем, включается и тепловая инерционность измерительной системы. Неравномерность тепловыделений по толщине ротора ЭТМП вызывает еще один вид погрешности. Закон распределения потерь по толщине ротора подчинен экспоненциальной зависимости:

$$q_v = q_{v0} \cdot \exp(-\beta \cdot y/\delta), \quad (5)$$

где q_v - тепловыделение на внутренней поверхности массивного ротора; δ - толщина ротора; y - координата по толщине ротора; β - коэффициент неравномерности потерь (для массивного ротора из стали марки Ст. 3 $\beta = 4,2$).

Таким образом, указанная поправка, величину которой можно определить по известной зависимости [6], может достигать 15%, но вместе с тем, несколько увеличивается допустимое расчетное время процесса.

На рис. 5 представлены температурные кривые по показаниям термопар, размещенных в массиве цилиндрического ротора на глубине 5 мм от внешней поверхности ротора.

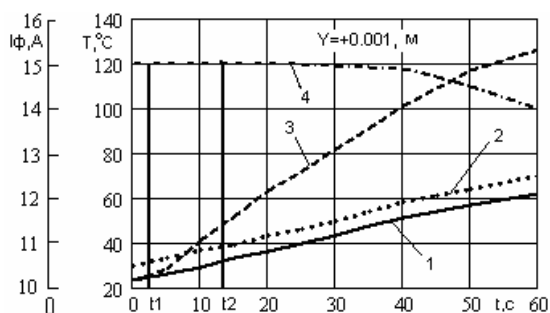


Рис. 5. Зависимость $T = f(t)$ в массивном роторе ЭТМП:

- 1 – активная зона с преимущественным значением E_a ;
- 2 – активная зона с преимущественным значением при повторном включении; 3 – кольцевая зона концевых частей с преимущественным значением E_t ; 4 – изменение значений фазного тока статора

Как видим, проявляется погрешность начального участка температурных кривых, вызванная в основном индуктивностью ЭТМП.

Расчет удельных потерь ведем по практической формуле $q_v = c \cdot \rho \cdot \Delta T / (t_2 - t_1)$. Предельное значение времени t_2 выбрано исходя из двух условий: сохранение адиабатического режима и постоянство значения q_v .

Первое условие будет выполняться, если t_2 рассчитать по формуле

$$t_2 \leq 1,2 \cdot 10^6 \cdot \sqrt{\delta^3 / \alpha \cdot \lambda}, \quad (6)$$

где δ - расстояние от точки размещения горячего слоя термопары до охлаждаемой поверхности ротора; λ - коэффициент теплопроводности материала ротора (для углеродистой стали $\lambda = 45$ Вт/(м·К)); α - коэффициент теплоотдачи (для цилиндра с винтовыми лопатками $\alpha = 15$ Вт/(м²·К)).

Для нашего случая предельное время t_2 , найденное по формуле (6), составляет примерно 16 с. Такое же значение t_2 мы получаем и по второму условию: изменение тока статора ЭТМП становится заметным после 15 с (см. рис. 5). Поэтому расчетное значение величины ΔT и Δt берем после плоского участка температурной кривой в диапазоне времени $t_1 < t \leq t_2$.

Для установления баланса активной мощности ЭТМП наряду с регистрацией температурных изменений и последующих расчетов q_v были выполнены измерения потребляемой активной мощности, расчет потерь в обмотке статора P_{m1} и потерь в стали статора P_c . Расчет удельных потерь в роторе произведен для таких основных зон: зона с преимущественным значением E_a , две кольцевые зоны концевых частей модулей, где преимущественное значение имеет тангенциальная составляющая электрической напряженности E_t контуров вихревых токов.

Очевидно, что суммарная активная мощность в роторе определяется по выражению:

$$P_p = q_{va} \cdot V_{pa} + 2q_{vt} \cdot V_{pt}, \quad (7)$$

где q_{va}, q_{vt} - соответственно удельные потери в активных и торцевых частях массивного ротора; V_{pa}, V_{pt} - соответственно объемы цилиндрических активных и концевых частей ротора.

С учетом расчетов по формуле (5) значение P_p , полученное по формуле (7) увеличено на 13%.

Распределение потребляемой активной мощности ЭТМП представлено на рис. 6.



Рис. 6. Диаграмма распределения активной мощности двигательного модуля ЭТМП

ВЫВОДЫ

1. Установлены закономерности распределения теплового поля и электрического поля контуров вихревых токов в массиве ротора ЭТМП.

2. Установлены зоны экстремальных значений напряженности электромагнитного поля, плотности вихревых токов и удельных потерь, влияющие на равномерность распределения температуры и электромагнитных моментов вращения.

3. Получено экспериментальное подтверждение адекватности обобщенной модели для расчета электромагнитных и тепловых характеристик ЭТМП.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Пат. 50242 Украина. 7F26B17/16. Шнековый сушильный аппарат / М.М. Заблодский, В.Ф. Шинкаренко, П.И. Захарченко та інш.- №8244; Заявлено 11.2001; Опубл. 17.01.2005, Бюл.№1.
- [2] Заблодский Н.Н. Нелинейность тепломеханических нагрузок шнекового электротепломеханического преобразователя // Электротехника і Електромеханіка.- 2005.- №1.- С. 41-43.
- [3] Лищенко А.И., Лесник В.А. Асинхронные машины с массивным ферромагнитным ротором.- К.: Наукова думка, 1984. - 168 с.
- [4] Вербовой П.Ф., Сьянов А.М., Зеленый Б.Г. Асинхронные двигатели с внешним чугуном ротором // Техн. електродинаміка.- 1995.- №6.- С. 21-24.
- [5] Васильковский Ю.Н., Заблодский Н.Н. Моделирование полей и характеристик электротепломеханических преобразователей технологического назначения // Техн. електродинаміка. Тем. вип.. Проблеми сучасної електромеханіки.- 2006, част.7.- С. 41-44.
- [6] Гуревич Э.И. Тепловые испытания и исследования электрических машин.- Л.: Энергия, 1977.- 296 с.

Поступила 18.10.2006