

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОБАВОЧНЫХ ПОТЕРЬ В СТЕРЖНЯХ ОБМОТКИ СТАТОРА, ВЫНЕСЕННОЙ В ВОЗДУШНЫЙ ЗАЗОР МАШИНЫ

Л. О. ОГАНЯН, К. А. ХОРЬКОВ

Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники

Использование в синхронных машинах обмотки якоря, вынесенной в воздушный зазор машины, позволяет более компактно выполнить зубцовую зону машины, что приводит к уменьшению веса стали статора и изоляции примерно в два раза. Появляется возможность значительно повысить индукцию в воздушном зазоре машины. Снижается величина индуктивного сопротивления рассеяния обмотки статора. Последнее особенно важно для генераторов ударной мощности. Однако в обмотке, размещенной на гладком якоре, появляются дополнительные электрические потери, величина которых зависит от основного потока машины. Представляет интерес оценить величину этих добавочных потерь по отношению с основными потерями в меди обмотки статора.

Определение добавочных потерь проводим при допущении, что обмотка статора развернута в тангенциальном направлении, поперечные размеры стержней малы по сравнению с их длиной, внешнее поле плоскопараллельно, причем распределение его вдоль сторон каждого стержня аналогично и известно. Влияние вихревых токов на внешнее поле не учитываем. Расчетная схема задачи приведена на рис. 1. Решение ищем с помощью векторного потенциала \bar{A} , связанного с индукцией в рассматриваемом объеме поля соотношением

$$\bar{B} = \text{rot } \bar{A}. \quad (1)$$

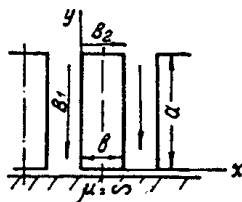


Рис. 1. Расчетная схема

Если стержни обмотки статора имеют удельную проводимость γ и магнитную проницаемость μ , а вектор индукции изменяется во времени с угловой частотой ω , то уравнение Максвелла [1], описывающее поле внутри стержня, можно привести к виду

$$\frac{\partial^2 \dot{A}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \dot{A}}{\partial y^2} = j\omega \gamma \mu \dot{A}, \quad (2)$$

где

$$\dot{A} = \sum_{n=1}^{\infty} (D_1 e^{\lambda y} + D_2 e^{-\lambda y}) \cos kx; \quad (3)$$

$$\lambda = \sqrt{k^2 + p^2}; \quad (4)$$

$$p^2 = j\omega\gamma\mu; \quad (5)$$

$$k^2 = \left(\frac{n\pi}{T}\right)^2, \quad (6)$$

$D_1; D_2$ — постоянные интегрирования,
 λ — пространственная частота поля в теле экрана,
 T — период разложения. Для поверхностей $x=0$ и $x=b$
 $T=a$; для поверхности $y=a$ $T=b$.

Постоянные интегрирования определяются из условия непрерывности тангенциальных составляющих поля на поверхностях $x=0$, $x=b$ и $y=a$ и отсутствия указанной составляющей на поверхности $y=0$, в связи с расположением стержня в непосредственной близости от ферромагнитной поверхности с $\mu = \infty$.

В результате преобразований имеем

$$\dot{A}_1 = \frac{2\dot{B}_1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{1}{(2n-1)} \cdot \frac{\operatorname{sh} \frac{\lambda_1}{2} \left(x - \frac{b}{2}\right)}{\lambda_1 \operatorname{ch} \frac{\lambda_1}{2} b} \cos \frac{n\pi}{a} y; \quad (7)$$

$$\dot{A}_2 = \frac{2\dot{B}_2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{1}{(2n-1)} \cdot \frac{\operatorname{ch} \lambda_2 y}{\lambda_2 \operatorname{sh} \lambda_2 a} \cdot \cos \frac{n\pi}{b} x; \quad (8)$$

где

$$\lambda_1 = \sqrt{\left(\frac{n\pi}{a}\right)^2 + j\omega\gamma\mu};$$

$$\lambda_2 = \sqrt{\left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + j\omega\gamma\mu};$$

$$\dot{B}_1 = \sum_{n=0}^{\infty} \dot{B}_{1T} \cos \frac{n\pi}{a} y; \quad (9)$$

$$\dot{B}_2 = \sum_{n=0}^{\infty} \dot{B}_{2T} \cos \frac{n\pi}{b} x; \quad (10)$$

$\dot{B}_{1T}; \dot{B}_{2T}$ — коэффициенты ряда Фурье при разложении кривой индукции соответственно в интервалах $0 \leq y \leq a$ и $0 \leq x \leq b$.

Распределение плотности вихревого тока в стержне обмотки определяем как

$$\delta = -j\omega\gamma\dot{A}, \quad (11)$$

а потери в стержне

$$P = \frac{1}{2\gamma} \int_V |\delta|^2 dV. \quad (12)$$

Исходя из (7, 8, 11 и 12), после преобразований получаем выражение для расчета потерь на единицу длины стержня:

$$P_1 = \frac{1}{8\pi^2} \omega^2 c^3 \gamma a \sum_{n=1}^{\infty} \frac{B_1^2}{(2n-1)^2} \eta_1; \quad (13)$$

$$P_2 = \frac{1}{16 \pi^2} \omega^2 c^3 \gamma b \sum_{n=1}^{\infty} \frac{B_2^2}{(2n-1)^2} \eta_2, \quad (14)$$

где c — глубина проникновения поля в тело проводника;

$$c = \sqrt{\frac{2}{\omega \gamma \mu}}; \quad (15)$$

$$\eta_1 = \frac{\operatorname{sh} \frac{b}{c} - \sin \frac{b}{c}}{\operatorname{ch} \frac{b}{c} + \cos \frac{b}{c}}; \quad (16)$$

$$\eta_2 = \frac{\operatorname{sh} 2 \frac{a}{c} + \sin 2 \frac{a}{c}}{\operatorname{ch} 2 \frac{a}{c} - \cos 2 \frac{a}{c}}. \quad (17)$$

Если обмотка состоит из m стержней, то потери от вихревых токов в меди обмотки статора на единицу длины будут равны

$$P_{\text{доб.}} = m(P_1 + P_2). \quad (18)$$

Сопротивление стержней вихревому току определяем как

$$r_{\text{вихр}} = \frac{P_{\text{доб.}}}{I_{\text{вихр}}^2}, \quad (19)$$

где

$$I_{\text{вихр}} = \int_S \delta \, dS. \quad (20)$$

Учитывая (13, 14, 12 и 11), получаем

$$r_{\text{вихр}} = \frac{\pi^2}{16} \frac{1}{\gamma c} \left[\frac{2}{a} \eta_1 + \frac{1}{b} \eta_2 \right]. \quad (21)$$

Если омическое сопротивление стержня

$$r_0 = \frac{1}{\gamma ab}, \quad \text{то } r_{\text{вихр}} = k_b r_0, \quad (22)$$

откуда

$$k_b = \frac{\pi^2}{16c} [a\eta_2 + 2b\eta_1]. \quad (23)$$

По изложенной методике были рассчитаны потери на единицу длины стержней для ударных генераторов с гладким якорем, выполненных с $2p=2, 4$ и 6 в предельных габаритах восьмиполусного генератора [2]. Результаты расчета подставлены в табл. 1.

Таблица 1

$2p$	2	4	6	8
f (Гц)	12,5	25	37,5	50
$P_{\text{доб}}$ (МВт)	2,18	3,1	3,8	4,4
$P_{\text{хх}}$ (МВт)	2,2	2,3	2,5	2,7

Добавочные потери в меди стержней обмотки статора рассчитаны для наихудшего варианта использования стержней из неизолированных

элементарных проводников. Расчеты показывают, что уровень добавочных потерь превышает в 1,5÷2,0 раза основные потери холостого хода машины. Величина добавочных потерь значительно снижается при выполнении стержней из изолированных элементарных проводников. На рис. 2 представлены зависимости коэффициента k_e от относительных геометрических размеров стержней обмотки статора $\left(\frac{b}{c}; \frac{a}{c} \text{ и } \frac{a}{b}\right)$.

Анализ кривых рис. 2 показывает, что уменьшение добавочного сопротивления стержня, а следовательно и добавочных потерь от вихревых токов, возможно путем разбиения сечения стержней на элементарные проводники.

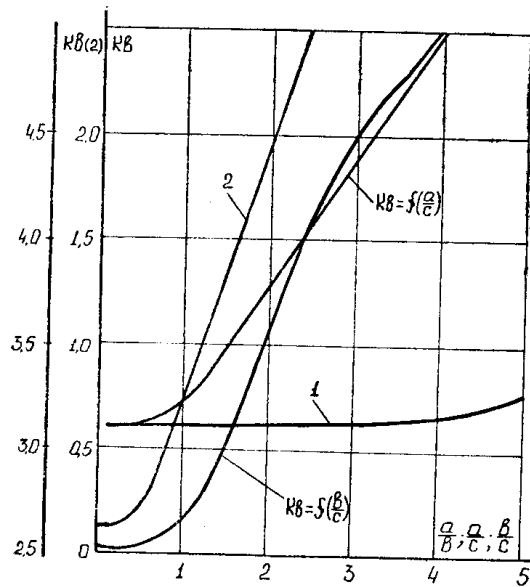


Рис. 2. Зависимость коэффициента k_B от относительных геометрических размеров стержня:

$$1. k_B = f\left(\frac{a}{b}\right) \text{ при } \frac{b}{c} = 0,2;$$

$$2. k_B = f\left(\frac{a}{b}\right) \text{ при } \frac{b}{c} = 2$$

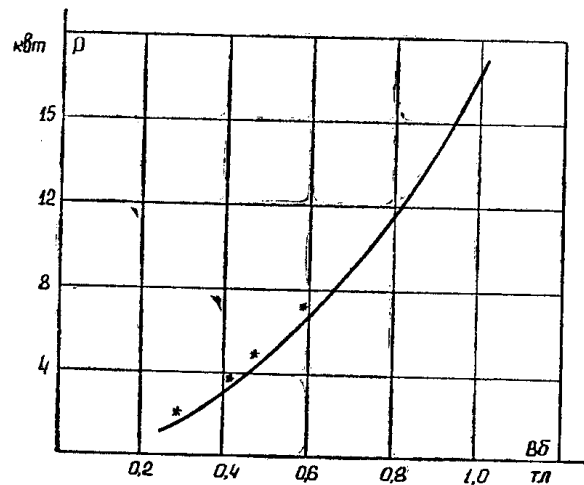


Рис. 3. Зависимость добавочных потерь в стержнях обмотки статора модели ударного генератора с гладким якорем от индукции в воздушном зазоре машины. * — экспериментальные точки

Изложенная методика расчета добавочных потерь была проверена экспериментальными исследованиями на модельном ударном генераторе с гладким якорем, выполненном в габаритах асинхронного двигателя АР-7 [3]. Расчетная кривая добавочных потерь в функции индук-

ции в воздушном зазоре машины представлена на рис. 3. На этом же рисунке знаком (*) представлены экспериментальные данные, любезно представленные нам доцентом В. Ф. Кулаковым. Очевидно хорошее совпадение результатов расчетов и экспериментов.

Таким образом, результаты исследований показывают, что добавочные потери от вихревых токов в стержнях обмотки статора не являются ограничивающим фактором в применении беспазовой конструкции статора в генераторах ударной мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Д. Купалян. Теоретические основы электротехники. «Энергия», М., 1970, ч. 3.
 2. Г. А. Сипайлов, К. А. Хорьков, Л. О. Оганян, В. З. Хорькова. О предельных энергиях ударного генератора с гладким якорем. Материалы Всесоюзного совещания «Силовые импульсные системы». Изд. ВНИИТИ, 1973.
 3. Г. А. Сипайлов, К. А. Хорьков, В. Ф. Кулаков, В. З. Хорькова, В. И. Андреев, В. С. Баклин. Модель синхронного генератора с гладким якорем. Известия ТПИ, т. 265, изд. ТГУ, Томск, 1973.
-