

ОСОБЕННОСТИ ГЕОМЕТРИИ КАТУШЕК МНОГОУРОВНЕВЫХ ОБМОТОК

Для багаторівневих двошарових обмоток електричних машин, що складаються із простих хвильових або простих петльових жорстких катушок, отримано розрахункові співвідношення, що дозволяють визначити розміри лобових частин катушок для кожного рівня їх розташування у пазах статора.

Для многоуровневых двухслойных обмоток электрических машин, состоящих из простых волновых или простых петлевых жестких катушек, получены расчетные соотношения, позволяющие определить размеры лобовых частей катушек для каждого уровня их расположения в пазах статора.

ВВЕДЕНИЕ

Для создания надежных обмоток электрических машин необходимо совершенствовать конструкцию катушек обмоток.

К примеру, распределенные двухслойные обмотки статоров тяговых асинхронных электродвигателей, питаемых от преобразователя частоты, необходимо проектировать таким образом, чтобы эффективные проводники по всей длине витков катушек имели не витковую, а корпусную изоляцию, иначе есть вероятность пробоя витковой изоляции проводников импульсным (пиковым) напряжением от преобразователя.

Если катушки выполнены многовитковыми, то нанести корпусную изоляцию по всей длине каждого витка катушки невозможно. С этой целью вместо многовитковой катушки можно применить соответствующее количество одновитковых катушек. Технология изготовления и укладки в статор таких катушек значительно упрощается и такая обмотка статора является более надежной при эксплуатации электродвигателя.

Примером такой обмотки может быть схема электрическая соединений, приведенная в [1].

При применении таких катушек (простых волновых или простых петлевых) актуальной задачей конструктора становится их размещение в зоне лобовых частей, поскольку, если вместо, например, трехвитковых катушек взять по три одновитковых, то они должны быть расположены в статоре по высоте обмотки в трех уровнях. Такая обмотка будет трехуровневой.

В практике ГП завода "Электротяжмаш" при проектировании и производстве тяговых асинхронных электродвигателей применяются двух- или трехуровневые двухслойные волновые обмотки статоров.

Для возможности укладки двухслойной многоуровневой обмотки требуется точный расчет геометрии лобовых частей катушки.

Катушки для каждого уровня расположения обмотки должны иметь различные геометрические размеры лобовых частей, т.е. катушки должны быть нескольких исполнений.

Известные методы расчета жестких катушек [2-4] более применимы для обычных одноуровневых двухслойных обмоток.

Расчет геометрии лобовых частей катушек многоуровневой двухслойной обмотки с применением этих методов оказался громоздким и в процессе поиска приемлемых решений авторами этой статьи была разработана новая методика расчета лобовых частей одновитковых катушек для многоуровневых двухслойных обмоток статоров машин переменного тока.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННЫХ ГЕОМЕТРИИ ЛОБОВЫХ ЧАСТЕЙ КАТУШКИ

На рис. 1 представлена в двух проекциях одновитковая катушка волновой обмотки.

Согласно рис. 1

$$h_1 = l_{1н} \cdot \sin \alpha_n = l_{1в} \cdot \sin \alpha_v, \quad (1)$$

где h_1 – вылет задней лобовой части катушки; $l_{1н}$ и $l_{1в}$ – соответственно, длины нижней и верхней задней лобовой части; α_n и α_v – соответственно, углы наклона нижней и верхней задней лобовой части.

$$l'_{1н} = \frac{l'_{1н}}{\cos \alpha_n}; \quad l'_{1в} = \frac{l'_{1в}}{\cos \alpha_v}, \quad (2)$$

где $l'_{1н}$ и $l'_{1в}$ – соответственно, проекции длин нижней и верхней задней лобовой части.

Проекции длин можно выразить как

$$l'_{1н} = \frac{\pi D_n}{360^\circ} \cdot \beta_{1н}; \quad l'_{1в} = \frac{\pi D_v}{360^\circ} \cdot \beta_{1в}, \quad (3)$$

где D_n и D_v – соответственно, диаметры расположения в пазу поверхностей проводников нижней и верхней сторон катушки; $\beta_{1н}$ и $\beta_{1в}$ – центральные углы нижней и верхней задней лобовой части катушки.

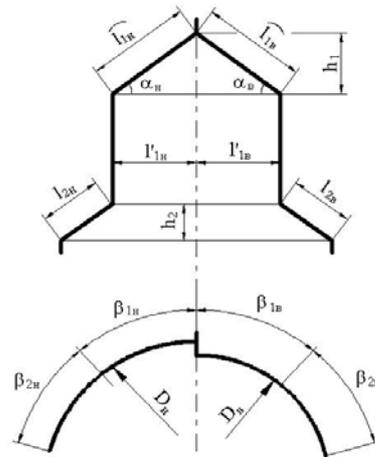


Рис. 1. Параметры лобовых частей катушки

Отсюда

$$\sin \alpha_n = \frac{(b_k + \Delta) \cdot z}{\pi D_n}, \quad (4)$$

$$\sin \alpha_v = \frac{(b_k + \Delta) \cdot z}{\pi D_v}, \quad (5)$$

где b_k – ширина лобовой части изолированной катушки; Δ – зазор между лобовыми частями двух соседних катушек (величина зазора задается в зависимости от принятой плотной или неплотной укладки); z – число пазов сердечника статора.

Выражение (1) с учетом (2)–(5) примет вид

$$\frac{\pi D_n \cdot \beta_{1н}}{360^\circ \cdot \cos \alpha_n} \cdot \frac{(b_k + \Delta) \cdot z}{\pi D_n} = \frac{\pi D_v \cdot \beta_{1в}}{360^\circ \cdot \cos \alpha_v} \cdot \frac{(b_k + \Delta) \cdot z}{\pi D_v}$$

Преобразовав это выражение, получим

$$\frac{\beta_{1н}}{\cos \alpha_n} = \frac{\beta_{1в}}{\cos \alpha_v} \quad \text{или} \quad \frac{\beta_{1н}}{\beta_{1в}} = \frac{\cos \alpha_n}{\cos \alpha_v}$$

Обозначим

$$\frac{\beta_{1H}}{\beta_{1B}} = \frac{\cos \alpha_H}{\cos \alpha_B} = K.$$

После преобразований

$$\beta_{1H} + \beta_{1B} = K\beta_{1B} + \beta_{1B} = \beta_{1B} \cdot (K+1) = \frac{360^\circ}{z} \cdot y_1,$$

где y_1 – задний шаг катушки (шаг по пазам).

$$\beta_{1B} = \frac{360^\circ \cdot y_1}{z \cdot (K+1)} = \frac{360^\circ \cdot y_1 \cdot \cos \alpha_B}{z \cdot (\cos \alpha_H + \cos \alpha_B)}, \quad (6)$$

$$\beta_{1H} = \frac{360^\circ \cdot y_1 \cdot \cos \alpha_H}{z \cdot (\cos \alpha_H + \cos \alpha_B)}. \quad (7)$$

Выражения (1) и (2) с учетом (6) и (7) после преобразований

$$l_{1H} = \frac{\pi D_H \cdot y_1}{z \cdot (\cos \alpha_H + \cos \alpha_B)}, \quad (8)$$

$$l_{1B} = \frac{\pi D_B \cdot y_1}{z \cdot (\cos \alpha_H + \cos \alpha_B)}, \quad (9)$$

$$h_1 = \frac{\pi D_H \cdot y_1 \cdot (b_k + \Delta) \cdot z}{z \cdot (\cos \alpha_H + \cos \alpha_B) \cdot \pi D_H}. \quad (10)$$

Выражения (3) с учетом (6) и (7) после преобразований

$$l'_{1H} = \frac{\pi D_H}{360^\circ} \cdot \frac{360^\circ \cdot y \cdot K}{z \cdot (K+1)} = \frac{\pi D_H \cdot y \cdot \cos \alpha_H}{z \cdot (\cos \alpha_H + \cos \alpha_B)}, \quad (11)$$

$$l'_{1B} = \frac{\pi D_B}{360^\circ} \cdot \frac{360^\circ \cdot y_1 \cdot K}{z \cdot (K+1)} = \frac{\pi D_B \cdot y_1 \cdot \cos \alpha_B}{z \cdot (\cos \alpha_H + \cos \alpha_B)}. \quad (12)$$

Характерное в полученных формулах (6)–(12) выражение

$$\frac{y_1}{z \cdot (\cos \alpha_H + \cos \alpha_B)}$$

назовем постоянной геометрии задних лобовых частей катушки, обозначим его C_{K1} :

$$C_{K1} = \frac{y_1}{z \cdot (\cos \alpha_H + \cos \alpha_B)}. \quad (13)$$

Выражения (6)–(12) с учетом (13) примут вид:

$$\beta_{1H} = 360^\circ \cdot C_{K1} \cdot \cos \alpha_H, \quad (14)$$

$$\beta_{1B} = 360^\circ \cdot C_{K1} \cdot \cos \alpha_B, \quad (15)$$

$$l_{1H} = C_{K1} \cdot \pi D_H, \quad (16)$$

$$l_{1B} = C_{K1} \cdot \pi D_B, \quad (17)$$

$$l'_{1H} = C_{K1} \cdot \pi D_H \cdot \cos \alpha_H, \quad (18)$$

$$l'_{1B} = C_{K1} \cdot \pi D_B \cdot \cos \alpha_B, \quad (19)$$

$$h_1 = C_{K1} \cdot z \cdot (b_k + \Delta). \quad (20)$$

Аналогичные математические действия можно выполнить и для передней лобовой части катушки, учитывая, что углы наклона задних и передних лобовых частей одинаковые.

В результате преобразований будет определена постоянная геометрии передних лобовых частей катушки C_{K2} и получены соотношения (рис. 1)

$$C_{K2} = \frac{y_2}{z \cdot (\cos \alpha_H + \cos \alpha_B)}, \quad (21)$$

где y_2 – передний шаг катушки (шаг по выводам),

$$l_{2H} = C_{K2} \cdot \pi D_H, \quad (22)$$

$$l_{2B} = C_{K2} \cdot \pi D_B, \quad (23)$$

$$\beta_{2H} = 360^\circ \cdot C_{K2} \cdot \cos \alpha_H, \quad (24)$$

$$\beta_{2B} = 360^\circ \cdot C_{K2} \cdot \cos \alpha_B, \quad (25)$$

$$h_2 = C_{K2} \cdot z \cdot (b_k + \Delta). \quad (26)$$

Размеры лобовых частей, рассчитанные по формулам (16), (17), (20), (22), (23), (26), образуют при укладке катушек цилиндрические поверхности.

На практике лобовые части обмотки необходимо поднять относительно поверхности расточки статора на угол γ , равный 5–6°, причем, с учетом технологии изготовления катушек с применением горбыля, этот угол в расчете следует задать равным 8°.

Для получения необходимых конических поверхностей указанные выше размеры лобовых частей следует разделить на косинус угла подъема лобовых частей катушки ($\cos \gamma$).

МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Предлагаемая методика расчета несложная и позволяет получить с приемлемой для производства электрических машин точностью результаты расчета геометрии катушек.

Исходными данными для расчета являются параметры $D_H, D_B, z, b_k, \Delta, y_1, y_2, \gamma$.

Результатами расчета являются параметры лобовых частей катушек многоуровневой двухслойной обмотки, рассчитываемые по формулам:

$$\alpha_B = \arcsin \frac{z \cdot (b_k + \Delta)}{\pi D_B},$$

$$\alpha_H = \arcsin \frac{z \cdot (b_k + \Delta)}{\pi D_H},$$

$$C_{K1} = \frac{y_1}{z \cdot (\cos \alpha_H + \cos \alpha_B)},$$

$$C_{K2} = \frac{y_2}{z \cdot (\cos \alpha_H + \cos \alpha_B)},$$

$$l_{1H} = \frac{C_{K1} \cdot \pi D_H}{\cos \gamma},$$

$$l_{1B} = \frac{C_{K1} \cdot \pi D_B}{\cos \gamma},$$

$$l'_{1H} = C_{K1} \cdot \pi D_H \cdot \cos \alpha_H$$

$$l'_{1B} = C_{K1} \cdot \pi D_B \cdot \cos \alpha_B,$$

$$\beta_{1H} = 360^\circ \cdot C_{K1} \cdot \cos \alpha_H,$$

$$\beta_{1B} = 360^\circ \cdot C_{K1} \cdot \cos \alpha_B,$$

$$h_1 = \frac{C_{K1} \cdot z \cdot (b_k + \Delta)}{\cos \gamma},$$

$$l_{2H} = \frac{C_{K2} \cdot \pi D_H}{\cos \gamma},$$

$$l_{2B} = \frac{C_{K2} \cdot \pi D_B}{\cos \gamma},$$

$$\beta_{2H} = 360^\circ \cdot C_{K2} \cdot \cos \alpha_H,$$

$$\beta_{2B} = 360^\circ \cdot C_{K2} \cdot \cos \alpha_B,$$

$$h_2 = \frac{C_{K2} \cdot z \cdot (b_k + \Delta)}{\cos \gamma}.$$

Методика применима для расчета лобовых частей одновитковых катушек любого уровня расположения. Для расчета геометрии катушки конкретного уровня необходимо задать соответствующие этому уровню диаметры расположения в пазу поверхностей проводников нижней и верхней сторон катушки D_{hi} и D_{bi} (рис. 2).

ПРИМЕР РАСЧЕТА

В качестве примера приведен расчет лобовых частей катушек трехуровневой обмотки статора тяго-

вого асинхронного электродвигателя АД902У2.

После заполнения конструктором паз сердечника статора обмоточным проводом и изоляцией по высоте и ширине для первого, второго и третьего уровней расположения катушек определяются: диаметры расположения в пазу поверхностей проводников нижней и верхней сторон катушек трех исполнений, ширина лобовой части изолированной катушки, величина зазора между двумя соседними катушками в зависимости от укладки лобовых частей и задаются остальные исходные данные.

Исходные данные расчета приведены в табл. 1.

Результаты расчета лобовых частей катушек трех исполнений приведены в табл. 2 и 3.

Полученные параметры лобовых частей катушек используются при разработке чертежей катушек и приспособлений для их изготовления.

Исходные данные к расчету

Параметры	Значения параметров для исполнений катушек		
	1	2	3
$D_{н1}$, мм	345	368	390
$D_{в1}$, мм	357	379	401
z	36		
b_k , мм	7,9		
Δ , мм	0,1		
y_1	8		
y_2	10		
γ , град.	8		

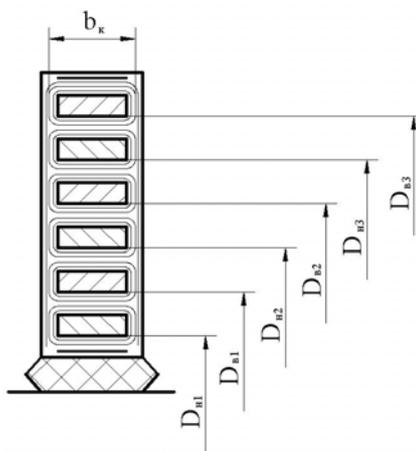


Рис. 2. Паз статора, заполненный двухслойной трехуровневой обмоткой

Параметры задних лобовых частей катушек

Параметры	Значения для исполнений катушек		
	1	2	3
α_n , град.	15,4	14,4	13,6
α_v , град.	14,9	14	13,2
$C_{к1}$, мм	0,116	0,115	0,114
$l_{1н}$, мм	121	128	135
$l_{1в}$, мм	125	132	139
$l'_{1н}$, мм	115	122	130
$l'_{1в}$, мм	119	126	134
$\beta_{1н}$, град.	39,7	39,8	39,9
$\beta_{1в}$, град.	40,3	40,2	40,1
h_1 , мм	33	34	35

Таблица 3

Параметры передних лобовых частей катушек

Параметры	Значения для исполнений катушек		
	1	2	3
$C_{к2}$, мм	0,144	0,143	0,142
$l_{2н}$, мм	151	160	169
$l_{2в}$, мм	156	165	174
$\beta_{2н}$, град.	49,7	49,8	49,9
$\beta_{2в}$, град.	50,3	50,2	50,1
h_2 , мм	40	41	42

ВЫВОДЫ

Для повышения надежности обмоток статора многовитковые катушки с витковой изоляцией можно, не изменяя обмоточных данных статора, заменить соответствующим количеством одновитковых катушек с нанесенной по всей длине катушек корпусной изоляцией. При этом обычная одноуровневая двухслойная обмотка выполняется как многоуровневая.

Для размещения многоуровневых обмоток статоров машин переменного тока разработана новая методика расчета катушек, основой которой являются полученные математические выражения постоянных геометрии лобовых частей катушек.

Методика расчета геометрии катушек многоуровневых обмоток прошла успешную апробацию и использовалась при разработке тяговых асинхронных электродвигателей АД902У2 для вагонов метрополитена (1994 г.), АД914У1 для грузопассажирского электровоза ДС-3 производства ДЭВЗ – Сименс (2004 г.), АД917УХЛ1 для грузовых тепловозов (2008 г.) и при проектировании тяговых асинхронных электродвигателей для трамваев и троллейбусов.

Методика расчета геометрии катушек многоуровневых обмоток статора может быть адаптирована применительно к многоуровневым обмоткам якорей машин постоянного тока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юрьев А.С. Патент Украины № 30838. Спосіб виготовлення багатопарової обмотки статора електричної машини.
2. Зимин В.И. и др. Обмотки электрических машин. М.: Энергия, 1975.- С. 268-273.
3. Сергеев П.С. и др. Проектирование электрических машин. М.: Энергия, М., 1969.- С. 90-92.
4. Постников И.М. Проектирование электрических машин. Киев: Издательство технической литературы УССР, 1960.-884с.

Поступила 02.02.2009

Юрьев Алексей Семенович,
Кульшицкий Леонид Петрович,
Евзикова Эммануэлла Гиришевна
ГП завод "Электротяжмаш"
Украина, 61055, Харьков, пр-т Московский, 299
тел. (0572) 956503