

УТОЧНЕННЫЙ РАСЧЕТ ПАЗОВОГО РАССЕЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Бочкарев Игорь Викторович, д.т.н., профессор, КГТУ им. И. Раззакова, 720044, г.Бишкек, пр. Ч. Айтматова, 66, e-mail: eltech@mail.ru.

Гунина Милана Геннадьевна, к.т.н., доцент, КГТУ им. И. Раззакова, 720044, г.Бишкек, пр. Ч. Айтматова, 66, e-mail: mg_gunina@mail.ru

Цель статьи – обосновать необходимость уточненного расчета пазового рассеяния электрических машин. А также предложить полученные формулы проводимостей наиболее употребительных форм пазов обмоток статора и короткозамкнутых роторов асинхронных двигателей.

Ключевые слова: асинхронная машина, обмотка статора, индуктивное сопротивление, проводимость рассеяния, форма паза.

REFINED CALCULATIONS GROOVES SCATTERING ELECTRIC MACHINES

Bochkarev Igor Victorovich, Ph.D., Professor, KSTU, I. Razzakova , 720044 , Bishkek , Pr. Ch. Aitmatov, 66, e-mail: elmech@mail.ru.

Gunina Milana Gennadiyevna, Ph.D., associate professor, KSTU, I. Razzakova , 720044 , Bishkek , Pr. Ch. Aitmatov, 66, e-mail: mg_gunina@mail.ru

The purpose of the article - to substantiate the need to clarify the calculation of scattering grooved electric cars. And also offer these formulas conductivities of the most common forms of the slots of the stator windings and squirrel cage induction motors.

Keywords: asynchronous machine, stator winding, the inductive reactance, scattering conductivity, the shape of the groove.

Введение. Рабочие и пусковые характеристики асинхронных электродвигателей (АД), определяющие эксплуатационные возможности АД, рассчитываются по эквивалентным схемам замещения, в которые входят активные и индуктивные сопротивления. Очевидно, что точность расчета характеристик однозначно зависит от точности расчета указанных сопротивлений. При этом рассеяния обмоток определяются полями рассеяния, поэтому задача уточненного расчета на путях замыкания поля рассеяния весьма актуальна.

Поле рассеяния разделяют на три составляющие – пазовое, лобовое и дифференциальное рассеяние. Соответственно, в расчет вводят проводимости пазового, лобового и дифференциального рассеяния. Рассмотрим вопросы уточненного расчета пазового рассеяния для различных типов и конфигураций пазов.

Постановка задачи. Проводимость пазового рассеяния λ_{Π} может быть выражена теоретически строго и, следовательно, ее можно вычислять с большой точностью, однако практически все формулы, которыми обычно пользуются при расчетах электрических машин, приближенные и имеют значительную погрешность (до 20%). Причины такого положения сложились исторически. Наличие в формулах логарифмов, тригонометрических и обратных функций делало формулы неудобными для инженерных расчетов, их считали сложными и старались всячески упростить, причем это упрощение проводилось за счет снижения точности. По этой причине появилось до десятка формул, упрощающих теоретическую формулу для расчета λ_{Π} , причем лучшая из них – формула Рихтера [3] давала до 10% погрешности. Теперь с развитием информационных технологий можно и нужно вернуться к точным теоретическим формулам. Вопросам анализа точности расчета известных формул пазового рассеяния и вывода новых уточненных аналитических выражений и посвящена настоящая статья.

Полученные результаты. Обобщенная формула для проводимости пазового рассеяния имеет вид:

$$\lambda_{\Pi} = \int_0^h \left(\frac{S_x}{S_{\Pi}} \right)^2 \frac{dx}{b_x} = \int_0^h \left(\frac{Q_x}{Q_{\Pi}} \right)^2 \frac{dx}{b_x}, \quad (1)$$

где S_x, Q_x – число проводников и площадь паза на высоте x ; S_{Π}, Q_{Π} – полное число проводников в пазу и площадь всего паза; b_x – ширина паза на высоте x .

Пользуясь (1) можно вывести формулу проводимости для любой формы паза статора или короткозамкнутого ротора электрической машины.

Наиболее простой случай конфигурации паза – **паз с параллельными стенками**. Рассмотрим сначала **открытый паз** такого типа (рис.1,а). Он имеет два участка проводимости. Участок высотой h_1 имеет проводники. Его проводимость

$$\lambda_1 = \int_0^{h_1} \left(\frac{b_{II} x}{b_{II} h_1} \right)^2 \frac{dx}{b_x} = \frac{h_1}{3b_{II}} \quad (2)$$

Участок высотой h_2 , не имеющий проводников. На всей высоте h_2 проводников нет, поэтому можно записать $Q_x = Q_{II}$, $b_x = b_{II}$. Проводимость этого участка

$$\lambda_2 = \int_0^{h_2} \frac{dx}{b_{II}} = \frac{h_2}{b_{II}} \quad (3)$$

Проводимость паза можно найти, сложив проводимости этих двух участков

$$\lambda_{II} = \lambda_1 + \lambda_2 = \frac{h_1}{3b_{II}} + \frac{h_2}{b_{II}} \quad (4)$$

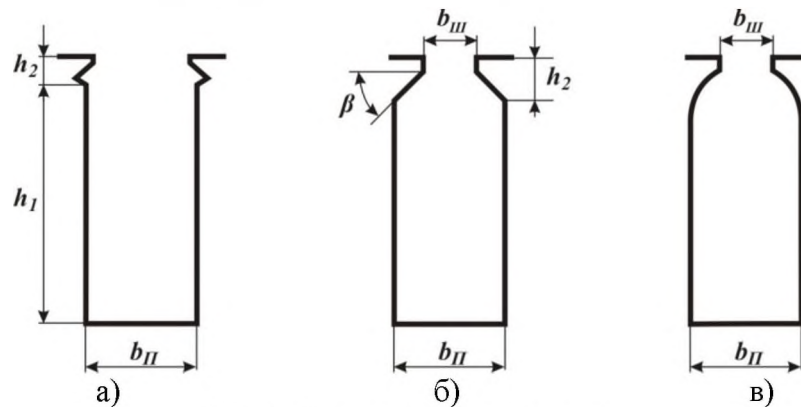


Рис.1. Открытый паз статора:

а – открытый паз; б – трапециевидальная форма верхней части паза;
в – полукруглая форма верхней части паза

Рассмотрим случаи, когда часть паза, не заполненная проводниками, имеет трапециевидальную или полукруглую формы.

Трапециевидальная форма (рис. 1,б).

Традиционная формула, которой пользуются до настоящего времени, справедливая для отношения $\frac{b_{II}}{b_{III}} = 4$, имеет вид

$$\lambda_2 = \frac{2,3h_2}{b_{II} + b_{III}} \quad (5)$$

Между тем правильная формула не выглядит сложнее, но намного точнее

$$\lambda_2 = \frac{h_2}{b_{II} - b_{III}} \ln \frac{b_{II}}{b_{III}} \quad (6)$$

Сравним эти формулы при распространенном угле скоса $45^\circ \frac{h_2}{b_{II} - b_{III}} = 0,5$

Результаты приведены в табл.1.

Таблица 1

$\frac{b_{II}}{b_{III}}$	2	3	4	5	6	7	8	9
λ_{II} по (6)	0,346	0,549	0,693	0,8	0,89	0,987	1,04	1,15
λ_{II} по (5)	0,38	0,57	0,69	0,766	0,82	0,863	0,894	0,94
ошибка %	10	4,7	0	4,4	8,5	16,4	16,3	22,3

Распространенная формула (5) дает ошибку до 22,3%.

Полукруглая форма (рис. 1, в).

Для полукруглой пустой части паза принимают $\lambda_2 = 0,66$ [3], 0,62 [4], 0,785 [1]. Поволоцкий М.Е. [2] выведена формула

$$\lambda_2 = \frac{\alpha}{2}, \quad (7)$$

где α – угол от горизонтали до линии шлица.

Согласно (7) при $\alpha = \frac{\pi}{2}$ (паз без шлица) $\lambda_2 = \frac{\pi}{4} = 0,785$. Пользоваться этой

формулой не очень удобно, так как шлиц включен в нее неявно. Так как $\alpha = \arccos \frac{b_{III}}{b_{II}}$, из (7) получим

$$\lambda_2 = \arccos \frac{b_{III}}{b_{II}}. \quad (8)$$

Для полукруглой верхней части паза широко используется формула [1]

$$\lambda_2 = 0,785 - \frac{b_{III}}{2b_{II}}. \quad (9)$$

В таблице 2 приведены значения проводимостей по (8) и (9).

Таблица 2

$\frac{b_{III}}{b_{II}}$	0	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
λ_2 по (8)	0,785	0,76	0,735	0,685	0,633	0,58	0,524	0,464
λ_2 по (9)	0,785	0,76	0,735	0,685	0,635	0,585	0,535	0,485

При $\frac{b_{III}}{b_{II}} \leq 0,3$ обе формулы дают одинаковые результаты, при больших величинах расхождение доходит до 5 %.

Рассмотрим теперь пазы, полностью заполненные проводниками.

Круглый паз. Площадь паза на высоте x равна площади кругового сегмента (рис.2).

$$Q_x = R^2(\alpha - \sin \alpha \cos \alpha); \quad b_x = 2R \sin \alpha.$$

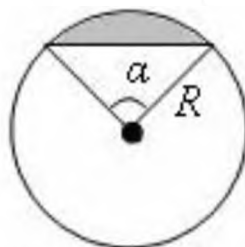


Рис.2. К расчету круглого паза

Приравняв дугу окружности с центральным углом α хорде получим $dS = R d\alpha$ и $dx = dS \sin \alpha = R \sin \alpha d\alpha$. Тогда из (1) имеем

$$\lambda_{II} = \int_0^{\pi} \frac{R^4 (\alpha - \sin \alpha \cos \alpha)^2}{Q_{II}^2} \cdot R \sin \alpha \quad (10)$$

Подставив пределы интегрирования получим

$$\lambda_{\Pi} = 6,15 \frac{R^4}{Q_{\Pi}^2} \quad (11)$$

Подставив в эту формулу площадь круга $Q_{\Pi} = \pi R^2$, получим проводимость круглого паза

$$\lambda_{\Pi} = 0,623 \quad (12)$$

Нижняя часть полуокруга. Проводимость паза находится аналогично предыдущему, пределы интегрирования от 0 до $\pi/2$, $Q_{\Pi} = \pi R^2 / 2$.

$$\lambda_{\Pi} = 0,352 \frac{R^4}{Q_{\Pi}^2} \text{ или } \lambda_{\Pi} = 0,143 \quad (13)$$

Верхняя часть полуокруга.

$$\lambda_{\Pi} = \frac{R^4}{2Q_{\Pi}^2} \int_0^{\pi/2} (\alpha + \sin \alpha \cos \alpha)^2 d\alpha = 1,137 \frac{R^4}{Q_{\Pi}^2}; \quad (13)$$

$$\lambda_{\Pi} = 0,46.$$

Паз любой формы, имеющий полукруглый верх, заполненный проводниками (рис.3,а).

Силовая линия на высоте x от центра полукруга охватывает также и всю нижнюю часть паза, поэтому охватываемая площадь состоит из двух частей – верхней от 0 до x и нижней от 0 до дна паза. Поэтому $Q_{\Pi} = Q_x + Q_H$, где Q_H - площадь нижней части паза. С учетом этого на основании (13) имеем

$$\lambda_2 = \frac{1}{Q_{\Pi}^2} \int_0^{\pi/2} (Q_H + R^2 \alpha + R^2 \sin \alpha \cos \alpha)^2 dx / 2 = \frac{1}{2Q_{\Pi}^2} \int_0^{\pi/2} (Q_H + 2Q_H R^2 \alpha^2 / 2 + + R^4 \alpha^3 / 2 + 2Q_H R \sin^2 \alpha / 2 + + R^4 (\frac{1}{4} \sin 2\alpha + \frac{\alpha}{2} \cos 2\alpha) + R^4 (\frac{1}{8} + \sin 4\alpha / 32)) \quad (14)$$

Подставив пределы интегрирования получим проводимость верхней части паза

$$\lambda_2 = \frac{1}{Q_{\Pi}^2} (0,7854 Q_H^2 + 1,734 Q_H R^2 + 1,1368 R^4). \quad (15)$$

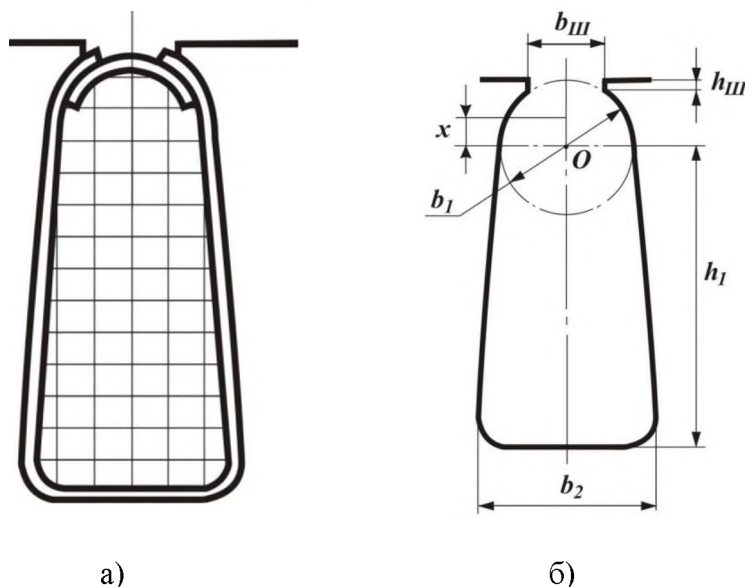


Рис. 3. Паз статора, полностью заполненный проводниками

Формула (15) справедлива для пазов любой формы. Рассмотрим паз в форме трапеции, полностью заполненный проводами (рис.3,б). Проводимость такого паза выводится по общей формуле (1).

$$Q_x = \frac{b_x + b_1}{2} x; \quad b_x = b_2 - \frac{b_1 - b_2}{h_1} x. \quad (16)$$

Подставив эти значения в (1) получим

$$\lambda_{II} = K \frac{h_1}{3b_2}, \quad (17)$$

$$\text{где} \quad K = \frac{3}{(1+a)^2} \left[\frac{\ln \frac{1}{a}}{(1+a)^3} - \frac{1}{(1-a)^2} - \frac{1}{2(1-a)} - \frac{1-a}{4} + 1 \right]. \quad (18)$$

В таблице 3 показаны значения K при различных значениях $a = b_2 / b_1$

Таблица 3

a	0,01	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
K	0,117	0,531	0,732	0,841	0,907	0,947	0,971	0,986	0,995	0,999	1
a	1,1	1,25	1,5	1,75	2,0	2,5	3	3,5	4	5	10
K	0,999	0,995	0,985	0,974	0,962	0,94	0,921	0,905	0,891	0,87	0,817

Таблица показывает, что если требования к точности невелики, то трапециевидные пазы, имеющие $a = 0,4 \div 0,35$, можно рассчитывать по формуле (17) или по формулам прямоугольных пазов (2). При этом в знаменатель нужно ставить меньшую ширину паза.

Если верхняя часть трапецеидального паза выполнена в форме полукруга (рис. 3,б) радиусом $R = 0,5b_1$ то, суммируя (15) и (17) получим формулу для проводимости всего паза. При этом формула (17) должна быть пересчитана по отношению квадратов площадей трапеции и всего паза.

$$\lambda_{II} = K \frac{h_1}{3b_2} \left(\frac{Q_H}{Q_{II}} \right)^2 + \frac{1}{Q_{II}^2} (0,785Q_H^2 + 0,434Q_H b_2^2 + 0,071b_2^4) + \frac{h_{III}}{b_{III}}. \quad (19)$$

В этой формуле K рассчитывается по (18).

$$h_1 = h_{II} - \frac{b_1}{2} - b_{III}; \quad Q_H = b_1 + \frac{b_2}{2} \cdot h_1; \quad Q_{II} = b_1 + \frac{b_2}{2} \cdot h_1 + \frac{\pi b_2^2}{4}. \quad (20)$$

Если верхняя часть полукруглого паза не заполнена проводниками, то проводимость паза получается простым суммированием формул (8) и (17)

$$\lambda_{II} = K \frac{h_1}{3b_2} + \frac{1}{2} \arccos \frac{b_{III}}{b_2} + \frac{h_{III}}{b_{III}}. \quad (21)$$

Формулы (19) и (21) можно применять для прямоугольного паза, приняв $K=1$;

$$Q_H = b_1 h_1; \quad Q_{II} = b_1 h_1 + \frac{\pi b_1^2}{8}.$$

В таблице 4 приведены проводимости пазов по (19) и распространенной формуле

$$\lambda_{II} = 0,62 + \frac{h_1}{3b_2}. \quad (22)$$

Таблица 4

$\frac{h_1}{b_1}$	0	0,5	1,0	2,0	3,0	5,0
λ_{II} по (19)	0,46	0,659	0,841	1,177	1,52	2,18
λ_{II} по (22)	0,62	0,787	0,953	1,287	1,62	2,29
погрешность %	34,7	19,4	13,3	9,3	6,8	5,1

Приближенная формула имеет существенную погрешность, которая уменьшается с увеличением высоты паза.

Заключение. На основании полученных выше выражений проводимостей получены формулы проводимостей наиболее употребительных форм пазов обмоток статора и короткозамкнутых роторов.

Предложенные формулы несколько сложнее используемых в настоящее время, но они имеют более высокую точность и поэтому могут быть рекомендованы к практическому использованию при расчетах любых типов электрических машин.

Список литературы

1. Проектирование электрических машин / Под. Ред. И. П. Копылова. – М.: Высш. шк., 2002. – 757 с.
2. Поволоцкий М. Е. Проектирование асинхронных электродвигателей. – Куйбышевское книжное издательство, 1970. – 375 с.
3. Рихтер Р. Электрические машины. Т.1 – М-Л., 1935. – 602 с.
4. Сергеев П. С., Виноградов Н. В., Горяинов Ф. А. Проектирование электрических машин. – М.: Энергия, 1970. – 632 с.