

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хуторецкий Г.М. и др. Турбогенераторы. Расчет и конструкция/Под ред. Н.П. Иванова и Р.А. Лютера. — Л.: Энергия, 1967.
2. Постников И.М. Проектирование электрических машин. — Киев: Гос. изд-во технич. л-ры УССР, 1960.
3. Гончаров В.И., Тейн Наинг Тун. Расчет потерь в массивных сердечниках электрических машин с помощью конечно-элементных моделей. — Изв. вузов. Электромеханика, 2010, № 2.
4. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. — М.: Изд-во МЭИ, 2004.
5. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. User's Manual. Version 4.0, 2004: org и http://femm.foster-miller.com.
6. Иванов-Смоленский А.В. Электромагнитные поля и процессы в электрических машинах и их физическое моделирование. — М.: Энергия, 1969.
7. Иванов-Смоленский А.В., Глазков В.П., Гончаров В.И. Электромагнитный расчет индукторного генератора с унипо-

лярной обмоткой возбуждения на статоре. — Электричество, 2007, № 10.

А в т о р ы: Габдуллин Никита Алексеевич окончил кафедру электромеханики Московского энергетического института (МЭИ) в 2012 г. Аспирант кафедры.

Глазков Владимир Петрович окончил кафедру электрических машин МЭИ в 1960 г. Кандидатскую диссертацию «Пусковые характеристики явнополюсных электрических машин с массивными полюсами» защитил в 1972 г. Начальник конструкторско-технологического отдела НТЦ-4 ФГУП ВЭИ.

Гончаров Владимир Иванович окончил кафедру электрических машин МЭИ в 1963 г. Старший преподаватель кафедры.

Панасюк Максим Борисович окончил кафедру электромеханики МЭИ в 2012 г. Аспирант кафедры.

* * *

Уточненный расчет сопротивления короткозамыкающего кольца «беличьей клетки» асинхронного электродвигателя

ЗАХАРЕНКО А.Б., ТАРАСЕНКО Д.А.

С использованием метода конечных элементов выполнен расчет потерь в активном сопротивлении беличьей клетки ротора асинхронного электродвигателя. Проведено сравнение полученных результатов с результатами традиционного аналитического метода расчета, введен коэффициент, учитывающий уменьшение сопротивления, рассчитанного численным методом по сравнению с аналитическим.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, беличья клетка, активное сопротивление, расчет

Расчет ряда характеристик асинхронных двигателей традиционно проводится с использованием схемы замещения. Для некоторых двигателей, имеющих малые значения отношения длины активной части к полюсному делению и пониженное сечение короткозамыкающего кольца, например двухскоростных, доля сопротивления короткозамыкающих колец в полном сопротивлении беличьей клетки ротора существенно увеличивается и может составить до 80% [1]. В этом случае значение уточнения расчета сопротивления элемента короткозамыкающих колец усиливается. В асинхронных двигателях единых серий доля сопротивления короткозамыкающих колец в сопротивлении ротора составляет обычно не более 4%. Однако, поскольку активное сопротивление ротора существенно влияет на критическое и номинальное скольжение, по-

Losses in the resistance of an asynchronous motor's rotor squirrel cage are calculated using the finite-element method. The obtained results are compared with the results yielded by the traditional analytical calculation method. A coefficient is introduced that takes into account the reduction of resistance calculated by the numerical method as compared with that obtained using the analytical method.

Key words: asynchronous electric motor, squirrel cage, resistance, calculation

тери в роторе и КПД, уточнение расчета этого сопротивления весьма актуально. Следует отметить, что в [1] сделана попытка уточнения расчета короткозамыкающего кольца методом конечных элементов. Однако расчеты проводились с использованием упрощенной 3D-модели, уподобленной параллелепипеду. Кроме того, были проанализированы характеристики исключительно специальных асинхронных машин. Рассмотрим алгоритм расчета активного сопротивления короткозамыкающего кольца с целью его уточнения.

Традиционно активное сопротивление беличьей клетки ротора короткозамкнутого асинхронного двигателя r_2 , не приведенное к числу витков обмотки статора, рассчитывалось с использованием формул [2]:

$$r_2 = r_c + 2r_{\text{кл}} / D^2; \quad (1)$$

$$r_c = r l_c / S_c; \quad (2)$$

$$r_{\text{кл}} = r p D_{\text{кл.ср}} / (z_R ab); \quad (3)$$

$$D = 2 \sin(pp / z_R), \quad (4)$$

где r_c – активное сопротивление стержня ротора; l_c и S_c – длина и сечение стержня беличьей клетки ротора; p – число пар полюсов; z_R – число пазов ротора; $r_{\text{кл}}$ – активное сопротивление элемента короткозамыкающего кольца беличьей клетки ротора между соседними стержнями; r – удельное сопротивление материала беличьей клетки ротора при рабочей температуре; $D_{\text{кл.ср}}$ – средний диаметр короткозамыкающего кольца беличьей клетки ротора; a и b – ширина и высота короткозамыкающего кольца беличьей клетки ротора соответственно.

Из (1) и (4) следует, что доля сопротивления короткозамыкающих колец в эквивалентном активном сопротивлении ротора наиболее высока в двухполюсных машинах. Анализируя формулу (3), можно предположить, что она была получена при упрощающем допущении, что распределение плотности тока внутри элемента короткозамыкающего кольца равномерное, соответствующее бесконечно узкому пазу ротора. Действительно, выражение (3) соответствует расчету активного сопротивления параллелепипеда длиной $p D_{\text{кл.ср}} / z_R$ и сечением ab . Такое допущение не отражает реального распределения тока, в результате чего расчетное значение активного сопротивления ротора определяется с погрешностью. Это особенно заметно при достаточно широких его пазах, когда длина линий тока заметно уменьшается. Оценим, какую погрешность оно вносит в расчет асинхронной машины.

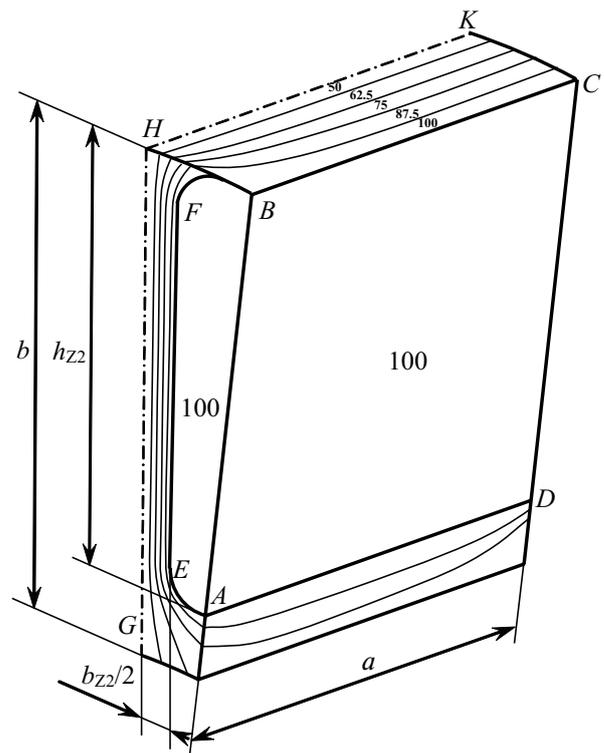
Рассмотрим в качестве примера асинхронный двигатель 4A160S2 номинальной мощностью 15 кВт, размеры активной части которого приведены в [3]. Активное сопротивление его стержня при 115 °С $r_c = 27,6$ мкОм, элемента короткозамыкающего кольца по общепринятой методике [2] $r_{\text{кл}} = 0,68$ мкОм, $D = 0,445$. Полное сопротивление беличьей клетки ротора составляет $r_2 = 34,5$ мкОм.

Уточним значение $r_{\text{кл}}$ с помощью метода конечных элементов. С этой целью решим трехмерную задачу расчета поля. Задача решалась для двух типов расчетной модели – тривиальной и уточненной. Обе модели были реализованы в среде ПО ANSYS [4, 5], тип задачи – Electric Conduction, тип элемента – Scalar Tet 98 (Solid 98) со степенями свободы по напряжению и току. В разделе свойств материала было задано только удельное электриче-

ское сопротивление алюминия при 115 °С $r = 4,8 \times 10^{-8}$ Ом/м, которое соответствует удельной проводимости $s = 20,5 \times 10^6$ м/Ом.

Тривиальная расчетная модель представляет собой параллелепипед со сторонами a , b , $p D_{\text{кл.ср}} / z_R$. Электрический потенциал задан на противоположных симметричных гранях с размерами $a' b$: $j_1 = 0$, $j_2 = \text{const}$, что соответствует допущению о равномерном распределении плотности тока внутри элемента короткозамыкающего кольца и аналитическому решению. Результатом расчета явились суммарные электрические потери в тривиальной расчетной модели Π_{Al-1} , которые соответствуют аналитическому решению.

Половина уточненной расчетной модели с учетом плоскости симметрии, показанной штрихпунктирной линией, представлена на рисунке. Кроме размеров короткозамыкающего кольца a и b на рисунке показаны высота зубца ротора h_{z2} и половина ширины зубца ротора $b_{z2}/2$.



Распределение электрического потенциала в уточненной расчетной модели

В уточненной расчетной модели на плоскостях $ABCD$ и $AEFB$ был задан электрический потенциал $j_2 = \text{const}$, на симметричных относительно плоскости GHK плоскостях (на рисунке не показаны) $j_1 = 0$. Следует отметить, что плоскость $AEFB$ является эквивалентом полупаза ротора асинхронного двигателя. Результатом расчета явились суммарные электрические потери в уточненной расчетной мо-

дели P_{Al_2} (в терминологии ANSYS – Joule heat). В обеих расчетных моделях содержалось практически одинаковое число конечных элементов.

Коэффициент уменьшения сопротивления элемента короткозамыкающего кольца рассчитывался по формуле

$$k_{Rk} = P_{Al_2} / P_{Al_1}. \quad (5)$$

Действительно,

$$P_{Al} = I^2 R = U^2 / R, \quad (6)$$

где $U = (j_2 - j_1)$ – разность потенциалов; R – активное сопротивление расчетной модели.

Учитывая, что разность потенциалов U в тривиальной и уточненной расчетных моделях одна и та же, коэффициент k_{Rk} равен отношению активного сопротивления тривиальной расчетной модели с бесконечно тонкими пазами к активному сопротивлению уточненной модели с пазами конечной ширины и, следовательно, характеризует уменьшение сопротивления последней, обусловленное укорочением линий тока.

Распределение электрического потенциала при $U = j_2 = 100$ мВ для 4A160S2 представлено на рисунке. С учетом поправочного коэффициента $k_{Rk} = 1,229$ (сопротивление КЗ кольца уменьшилось на 22,9%), $r_R = 33,18$ мкОм, что на 3,7% ниже, чем без учета этого коэффициента. Следует отметить, что современный аналог упомянутого двигателя 7AVER160S2 (см. далее данные завода-изготовителя ОАО «ВЭМЗ») при том же числе пазов ротора $z_R = 28$ имеет на 32% меньшее сечение короткозамыкающего кольца, но большее значение коэффициента $k_{Rk} = 1,328$.

Размеры короткозамыкающих колец асинхронных двигателей:

Двигатель	a , мм	b , мм
4A160S2	29	33,3
7AVER160S2	25	29,2

Значение сопротивления порядка десятков микроом достаточно сложно проверить прямым измерением из-за высокой погрешности.

При этом номинальная частота вращения возрастает у двигателя серии 4A не менее чем на 2%. При оптимизации асинхронных двигателей расхождение по номинальной частоте вращения даже на столь малое значение может повлиять на выбор наиболее предпочтительного варианта. Однако из-за малой доли сопротивления короткозамыкающего кольца в полном сопротивлении ротора у двигателей единых серий приближенный расчет этого сопротивления пригоден для инженерных методик.

Выводы. 1. Для серийных асинхронных двигателей с малой долей сопротивления короткозамыкающих колец беличьей клетки в активном сопротивлении ротора традиционная расчетная модель расчета сопротивления ротора пригодна для расчета характеристик двигателей единых серий.

2. При уточнении расчета активного сопротивления короткозамыкающего кольца с помощью метода конечных элементов можно получить уменьшение упомянутого сопротивления, например, для двигателя 4A160S2 на 22,9%, для 7AVER160S2 – на 32,8%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Захаренко А. Б., Семенчуков Г. А. Сопротивление коротко-замыкающего кольца беличьей клетки асинхронного электродвигателя. – Электричество, 2003, № 12.
2. Копылов И. П., Клоков Б. К., Морозкин В. П., Токарев Б. Ф. Проектирование электрических машин: учебник для вузов/Под ред. И. П. Копылова – М.: Высшая школа, 2002.
3. Кравчик А. Э. и др. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1982.
4. Басов К. А. ANSYS в примерах и задачах/Под общ. ред. Д. Г. Красковского – М.: Компьютер Пресс, 2002.
5. Каплун А. Б., Морозов Е. М., Олферьева М. А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. – М.: Едиториал УРСС, 2003.

Авторы: Захаренко Андрей Борисович окончил электромеханический факультет МЭИ (ТУ) в 1995 г. В 2009 г. защитил докторскую диссертацию в области исследования магнитоэлектрических машин с дискретно распределёнными обмотками. Начальник отдела ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ».

Тарасенко Дмитрий Александрович окончил Институт электротехники МЭИ (ТУ) в 2010 г. Аспирант кафедры «Электромеханика» НИУ «МЭИ».