

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОВЕРХНОСТНОГО ЭФФЕКТА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ТОКА И УДЕЛЬНЫХ ПОТЕРЬ В СТЕРЖНЯХ РОТОРА АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Гусаров А.А.

Донецкий национальный технический университет

Equations of the current density distribution and specific power loss distribution in the rotor rods of the induction motor 2ЭДКОФ250М4 are given on the ground of the theory of the flat polarized electromagnetic wave with account of the electric skin effect.

Key words: current density, specific power loss, rotor rods, induction motor, polarized electromagnetic wave, electric skin effect.

Введение. Среди основных задач в области расчетов и проектирования электротехнических устройств (асинхронных двигателей) на сегодняшний день является отказ от принимаемых ранее допущений и пренебрежений физическими процессами, протекающими в реальных устройствах. К одному из таких допущений следует отнести поверхностный электрический эффект в стержнях (обмотках) ротора. Нормальные короткозамкнутые асинхронные двигатели (АД) общего назначения строятся исключительно с переменными параметрами ротора. АД с постоянными параметрами ротора развивают недостаточный пусковой момент.

Асинхронные двигатели АД во взрывозащищенном исполнении составляют основу электропривода в угольной, нефтяной, газовой, химической промышленности и работают в различных режимах. Одним из характерных режимов является режим частых пусков, при которых очень быстро нагреваются обмотки АД.

Исследования показали [1], что основными причинами выхода из строя АД является пробой изоляции обмотки статора 40 – 60%, выплавление обмотки ротора 30 – 40%. Повреждение обмотки ротора связано с несоблюдением режима работы: пуск перегруженного двигателя, многократное включение, частые пуски под нагрузкой.

Большинство АД имеют короткозамкнутую литую обмотку ротора из алюминия, имеющую определенные преимущества по сравнению с медной обмоткой. Обычно считают, что причиной выплавления обмотки ротора является перегрузка двигателя. Высокий процент данного отказа свидетельствует о том, что причиной его появления является не только неправильная эксплуатация, а игнорирование электрического поверхностного эффекта, вызванного наличием глубокого паза, неравномерным распределением плотности тока и потерь в стержне ротора по высоте, и, в связи с этим, неравномерным нагревом стержней обмотки ротора как во времени, так и в пространстве.

Анализ публикаций. Анализ влияния случайного характера нагрузки на температурный режим работы подвергается асинхронный двигатель типа 2ЭДКОФ250М4, который широко используется в горнорудной и угольной промышленности в транспортной системе доставки угля из лавы до откаточного штрека и относится к числу наиболее напряженных электрических машин по нагреву, испытываемым нагрузкам, моментам (номинальным, пусковым и максимальным). Требования эксплуатации таковы, что в дальнейшем требуется наращивать мощность двигателей без существенного увеличения их габаритов и массы [2]. Допустимые значения мощности и тока в режимах S2, S3 и S4 двигателей машин и механизмов ограничиваются греющими потерями, определяющими температуру обмоток и зависящими от режима работы. В [1, 4] отмечается, что в режимах работы S3 и S4 температура стержней ротора достигает температуры плавления алюминия при номинальной температуре статора. В [5] показано, что вследствие высокого нагрева обмоток ротора конвейерных двигателей необходимо ограничить число повторных пусков нагруженного конвейера до двух. В [6] указывается, что после восьмого пуска температура ротора достигает температуры плавления алюминия и происходит выплавление короткозамкнутой обмотки ротора.

В случае максимального увеличения нагрузки двигателя обычного коэффициента запаса мощности 1,1 – 1,2 недостаточно. Резкое увеличение нагрузки на тяговые органы в реальных приводах возникает намного чаще чем принято в усредненном расчете и это является наиболее вероятной причиной выплавления обмотки ротора

Асинхронные двигатели тяговых машин и механизмов характеризуются быстро нарастающей тепловой перегрузкой, быстрым нарастанием температуры сверх нормальной рабочей температуры. Тепловая защита АД не может следить за температурой защищаемой части без отставания. Разность температур может привести к выходу двигателя из строя. Существующие тепловые защиты реагируют на усредненную температуру и абсолютно не учитывают температуру стержней ротора. Не учитывается пространственно-временное распределение плотности тока и удельных потерь стержней ротора, а следовательно, и пространственно-временное распределение температуры.

Цель работы. По результатам работы [8] определить влияние электрического поверхностного эффекта на распределение плотности тока и удельных потерь в стержнях ротора асинхронных двигателей.

Основное содержание исследования. Определение распределения плотности тока и удельных потерь мощности по высоте паза выполняется для АД типа 2ЭДКОФ250М4 для привода скребкового конвейера со следующими характеристиками: номинальное напряжение $U_{ном}=660\text{В}$; схема соединения обмоток статора – звезда; число пазов статора $Z_1=48$; ротора $Z_2=38$; число витков фазы обмотки статора $W_1=72$; обмоточные коэффициенты статора $K_{о61}=0,9$; ротора $K_{о62}=1$; ток ротора, обусловленный проникновением плоской электромагнитной волны в глубокий паз, приведенный к обмотке статора с учетом вытеснения тока: $I_2=411,76\text{ А}$; значение не приведенного тока: $I_2 = I_2' \cdot K_1 = 4213\text{ А}$; высота паза ротора $h_2 = 40\text{ мм}$; сечение паза ротора $S_2 = 166,96\text{ мм}^2$; длина ротора $l_2=270\text{ мм}$; удельное сопротивление алюминия при $t^0 = 200^0 - \rho_c = 5,057 \cdot 10^{-8}, \text{ Ом} \cdot \text{ м}$.

Расчет параметров обмотки ротора без учета вытеснения тока и с учетом вытеснения приведен для случая замены существующего паза ротора на эквивалентный паз прямоугольного сечения с глубиной равной высоте зубца и сечением равным сечению паза двигателя.

Высота стержня обмотки ротора $h_2 = 40\text{ мм}$;

Ширина стержня обмотки $b_2 = S_2 / h_2 = 4,17\text{ мм}$;

Среднее активное сопротивление $R_{20} = \rho_c \cdot \ell_2 / S_2 = 8,177 \cdot 10^{-5}, \text{ Ом}$;

Среднее индуктивное сопротивление

$$X_{20} = 7,9 \cdot 10^{-9} f_1 \ell_2 \lambda = 3,407 \cdot 10^{-4}, \text{ Ом}$$

$$\lambda = \frac{h_2}{3b_2} = 3,194 - \text{удельная магнитная проводимость паза}$$

Полное сопротивление стержня без учета вытеснения тока в пазу $Z_{20} = 3,504 \cdot 10^{-4}, \text{ Ом}$.

Средние потери в стержне ротора при токе короткого замыкания электродвигателя 2ЭДКОФ250М4:

$$\Delta P_{cp} = I_2^2 \cdot R_2 = 1451, \text{ Вт}$$

Удельные потери в стержне

$$P_{y\partial} = \frac{\Delta P_{cp}}{h_2 b_2 \ell_2} = 0,032 \text{ Вт} / \text{мм}^3$$

Сопротивление стержней ротора с учетом вытеснения тока определяем с помощью коэффициентов K_r и K_x [6], для этого определяем глубину проникновения волны $\Delta = 1 / \alpha = 16\text{ мм}$; эквивалентную высоту паза $\zeta = h / \Delta = 2,5$ и затем $K_r = 2,476$ и $K_x = 0,61$ [7].

Активное сопротивление с учетом вытеснения

$R_2 = K_r R_{20} = 0,2025 \cdot 10^{-3}, \text{ Ом}$; индуктивное сопротивление с учетом вытеснения $X_2 = K_x \cdot X_{20} = 0,2079 \cdot 10^{-3}, \text{ Ом}$; полное сопротивление стержня $Z_2 = 0,2898 \cdot 10^{-3}, \text{ Ом}$.

Коэффициент влияния вытеснения на полное сопротивление стержня:

$$k = \frac{Z_2}{Z_{20}} = 0,828.$$

Из решения уравнений для плоской электромагнитной волны [8] распределение плотности тока для режима несостоявшегося пуска двигателя при токе в обмотке ротора $I_2 = 4213\text{ А}$:

$$\delta_2 = \sqrt{I_2^2 \frac{p_1 p_2}{b_2^2} \left[\frac{\text{Ch}(p_1(h_2 - z)) \text{Ch}(p_2(h_2 - z))}{\text{Sh}(p_1 h_2) \text{Sh}(p_2 h_2)} \right]},$$

где P_1 – постоянная распространения волны:

$$p_1 = (0,5\omega\gamma\mu_a)^{0,5} + j(0,5\omega\gamma\mu_a)^{0,5} = \alpha + j\beta;$$

$$p_2 = (0,5\omega\gamma\mu_a)^{0,5} - j(0,5\omega\gamma\mu_a)^{0,5} = \alpha - j\beta;$$

Распределение удельных потерь по высоте стержня:

$$P_{y\partial} = I_2^2 \frac{\rho_c p_1 p_2}{b_2^2} \left[\frac{\text{Ch}[p_1(h_2 - z)] \text{Ch}[p_2(h_2 - z)]}{\text{Sh}(p_1 h_2) \text{Sh}(p_2 h_2)} \right].$$

Средние удельные потери с учетом вытеснения тока определены по выражению:

$$P_{y\partial, cp} = \frac{[\text{Sh}(p_2 - p_1)h_2](p_1 + p_2) - \text{Sh}[(p_1 + p_2)h_2](p_1 - p_2)] p_1 p_2 \rho_c I_2^2}{2h_2 b_2^2 \text{Sh}(p_1 h_2) \text{Sh}(p_2 h_2) (p_2^2 - p_1^2)} = 79,7 \cdot 10^{-3}, \text{ Вт} / \text{мм}^3$$

Результаты расчетов распределения δ_2 и $P_{уд, cp}$, $P_{уд}$ приведены в табл. 1.

Суммарные потери с учетом вытеснения, Вт:

$$P_{\Sigma} = P_{y\partial, cp} \cdot h_2 b_2 l_2 = 3,594 \cdot 10^3.$$

Таблица 1 – Распределение δ_2 и $P_{уд}$ по высоте стержня

Частота f_2	$I_2=4213A$	$Z=0,$ мм	$Z=10,$ мм	$Z=20,$ мм	$Z=30,$ мм	$Z=40,$ мм	Ср. значение	$P_{\Sigma},$ Вт
50 Гц с учетом вытеснения тока	$\delta,$ А/мм ²	89,5	46,9	23,9	15,4	14,7	25,23	
	$P_{уд},$ Вт/мм ³	$405 \cdot 10^{-3}$	$111 \cdot 10^{-3}$	$29 \cdot 10^{-3}$	$12 \cdot 10^{-3}$	$10,9 \cdot 10^{-3}$	$79,7 \cdot 10^{-3}$	3594
$1,0 \cdot 10^{-3}$ Гц без учета вытеснения тока	$\delta,$ А/мм ²	25,23			25,23			
	$P_{уд},$ Вт/мм ³	$32 \cdot 10^{-3}$			$32 \cdot 10^{-3}$		1451	

Выводы:

1. Поверхностный электрический эффект при неизменном токе ротора приводит к повышению плотности тока в верхней части паза по отношению к плотности тока у дна паза в 6,1 раза; удельных потерь мощности соответственно в 37,2 раза; средней плотности потерь в 2,49 раза.

2. В установившемся режиме работы при отсутствии вытеснения тока и токе ротора 4213 А, потери в стержне 1451 Вт; при наличии вытеснения тока при том же токе – потери в стержне 3594 Вт.

3. Неравномерное распределение удельных потерь приводит к изменению теплового сопротивления от точки со средней температурой стержня до поверхности ротора – эквивалентного теплового сопротивления входящего в методики теплового расчета двигателя.

4. Влияние вытеснения тока на распределение плотности тока и удельных потерь, влияющих на нагрев стержня, необходимо учитывать при разработке средств защиты от перегрева, диагностики двигателя и, тем самым, способствовать увеличению срока службы, повышению надежности в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ткачук А.Н., Аниканов А.И. Влияние повышения энерговооруженности скребковых конвейеров на аварийность их приводных электродвигателей. // Взрывозащищенное оборудование. – Сб. науч. трудов УкрНИИВЭ. –2003. –с. 126 – 134.

2. Ковалев Е.Б., Гусаров А.А. Повышение мощности асинхронных двигателей скребковых конвейеров и других забойных машин. // Праці ЛВМАІ №2 (15) – 2007. частина II. –с. 74-78.

3. Ширнин И.Г., Ткачук А.Н. Электротехнические характеристики асинхронных двигателей скребковых конвейеров.//Праці ЛВМАІ №1 (12) – 2006. –с. 73-83.

4. Ширнин И.Г., Ткачук А.Н. Короткозамкнутые обмотки роторов двигателей подземных машин. // Праці ЛВМАІ №2 (9) – 2004. –с. 97-104.

5. Шейко В.Г., Гармаш О.Н., Шейко С.Г. Влияние пуска двигателей 2ЭДКОФ250LD4 и 2ЭДКЛОФЛВ4 в приводе конвейера на температуру стержней ротора. // Взрывозащищенное оборудование. – Сб. науч. трудов УкрНИИВЭ. –2003. –с. 88 – 93

6. Каваре Ясер Хусейн. Учет эффекта вытеснения тока в стержне ротора асинхронного электродвигателя при его моделировании в среде МАТЛАВ. // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: “Електротехніка і енергетика”, вип. 67. Донецьк: ДонНТУ, 2003 –с. 160 – 163.

7. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Часть 3 «Основы теории электромагнитного поля». М.: Высшая школа, -1978. –224 с.

8. Ковалев Е.Б., Гусаров А.А. Распределение плотности тока и удельных потерь мощности в короткозамкнутых обмотках ротора двигателей подземных машин. // Взрывозащищенное электрооборудование.

– Сб. науч. трудов УкрНИИВЭ /Под. Общей редакцией академика НАН Украины Г.Г. Пивняка. – Донецк: ООО «Юго-Восток ЛТД» –2008.

Рекомендовано д.т.н. Ковальовим Є.Б.