

УДК 621.313.333

**РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ
ТЕМПЕРАТУРЫ КЛЕТКИ РОТОРА АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С
УЧЕТОМ ПОВЕРХНОСТНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА****Ковалев Е.Б., д.т.н., проф.***Донецкий национальный технический университет**E-mail: Office@mail.ru***Гусаров А.А., инж.****ООО «ПКФ «ТЕХМА»»***83052, г. Донецк, б. Шахтостроителей, 7а**E-mail: alan@online.dn.ua*

Обговорюється питання розрахунково-теоретичного визначення зміни температури клітки ротора асинхронних двигунів з урахуванням поверхневого електричного ефекту з метою забезпечення строку служби двигунів, надійності роботи і їх теплового захисту.

Ключові слова: асинхронний двигун, розподіл, питомий, температура.

The question of calculation-theoretical determination of change of temperature of cage of rotor of asynchronous engines comes into a question taking into account a superficial electric effect with the purpose of providing of term of service of engines, reliability of work and their thermal defense.

Key words: asynchronous engine, distributing, specific, temperature.

Введение. Асинхронные двигатели (АД) во взрывозащищенном исполнении составляют основу электропривода в угольной, нефтяной, газовой и химической промышленности и работают в различных режимах. Одним из характерных режимов является режим частых пусков подряд, 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 механизма; многократное включение при котором АД остается при не достигшим номинальной частоты вращения; частые пуски под нагрузкой и т.д. Большинство АД имеют короткозамкнутую литую обмотку ротора из алюминия, имеющую определенные преимущества перед медной обмоткой [2].

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 и игнорирование электрического поверхностного эффекта вызванного наличием глубокого паза, неравномерным распределением плотности тока и потерь в стержне по высоте, и, в связи с этим, неравномерным нагревом стержней обмотки ротора.

Анализ предыдущих исследований. Известно множество научных работ посвященных изучению случайного характера нагрузки на температурный

режим работы АД. Однако, вопросам влияния электрического поверхностного эффекта в обмотке ротора уделяется не достаточное внимание. В [3] показано, что вследствие высокого нагрева обмотки ротора конвейерных АД необходимо ограничить число повторных пусков до двух. В [4] указывается, что после восьмого пуска температура ротора достигает температуры плавления алюминия (658°C) и происходит выплавление короткозамкнутой обмотки ротора. В случае максимального увеличения нагрузки двигателя обычного коэффициента запаса мощности ($K_m=1,1\div 1,2$) 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 [5]. Асинхронные двигатели тяговых машин и механизмов характеризуются быстро нарастающей тепловой перегрузкой, быстрым нарастанием температуры сверх нормальной рабочей температуры. Защита АД – термодетекторы или температурно-токовые реле не может следовать за температурой защищаемой части без отставания. Разность температур может привести к выходу двигателя из строя. В связи с этим, возникает необходимость применения комбинированных систем защиты. Построение такой системы требует знания теплового состояния двигателя и проведения температурной диагностики ротора АД.

Цель работы – определить распределение температуры по высоте паза ротора АД с учетом поверхностного электрического эффекта; на основа-

нии теории плоской линейно поляризованной электромагнитной волны разработать математические выражения распределения плотности тока, удельных потерь мощности по высоте стержня ротора АД и на их основе определить пространственно-временное изменение температуры по высоте паза ротора.

Материал и результаты исследования. В основу распределения плотности тока, удельных потерь мощности по высоте стержня ротора АД положены уравнения Максвелла для плоской электромагнитной волны [6].

Дифференциальное уравнение плоской электромагнитной волны есть уравнение вида:

$$\frac{d^2 \mathcal{H}}{dz^2} = j\omega\mu_a \mathcal{H}. \quad (1)$$

Его решение записывается следующим образом:

$$\mathcal{H} = \mathcal{C}_1 e^{pz} + \mathcal{C}_2 e^{pz}, \quad (2)$$

где \mathcal{H} - функция только одной переменной z (А/м); \mathcal{C}_1 и \mathcal{C}_2 - постоянные интегрирования, комплексные; $p = (j\omega\mu_a)^{0,5}$ - постоянная распространения волны (m^{-1}); $j^{0,5} = \frac{1-j}{\sqrt{2}}$ - единичный орт оси Y декартовой системы координат; $\omega = 2\pi f_1 s$ - угловая частота тока ротора; γ - проводимость ($1/(Om \cdot m)$); μ_a - магнитная проницаемость ($Гн/м$).

Подставив (4) в (3) получим постоянную распространения волны:

$$\mathcal{P}_1 = (0,5\omega\mu_a)^{0,5} + j(0,5\omega\mu_a)^{0,5} = \alpha + j\beta, \quad (3)$$

и сопряженную ей

$$\mathcal{P}_2 = (0,5\omega\mu_a)^{0,5} - j(0,5\omega\mu_a)^{0,5} = \alpha - j\beta. \quad (4)$$

Приняв за глубину распространения волны $\Delta = 1/\alpha$ и эквивалентную величину проникновения тока $\zeta = h_2/\Delta$ [6], с учетом коэффициентов K_r и K_x [7], получим распределение напряженности электрического поля по высоте стержня ротора:

$$\mathcal{E} = -\frac{1}{\gamma} \frac{d\mathcal{H}}{dz} = \frac{\mathcal{P}_1 I_2}{\gamma b_2} \frac{\text{ch}[\mathcal{P}_1 (h_2 - z)]}{\text{sh}(\mathcal{P}_1 h_2)}. \quad (5)$$

Распределение плотности тока по высоте стержня:

$$\mathcal{J}_2 = \gamma \mathcal{E} = \frac{\mathcal{P}_1 I_2}{b_2} \frac{\text{ch}[\mathcal{P}_1 (h_2 - z)]}{\text{sh}(\mathcal{P}_1 h_2)}, \quad (6)$$

где I_2 – ток в стержне ротора; b_2 – ширина паза; h_2 – глубина паза; z – координата тела по оси Z .

Модуль плотности тока δ_2 определяется как корень квадратный из произведения сопряженных комплексов:

$$\delta_2 = \sqrt{\mathcal{J}_2 \mathcal{J}_2^*},$$

где \mathcal{J}_2^* – сопряженный комплекс плотности тока, получаемый подстановкой в (6) вместо \mathcal{P}_1 сопряженную величину \mathcal{P}_2 (4).

После подстановки и преобразований получим модуль плотности тока в виде, (А/м²):

$$\delta_2 = \sqrt{I_2^2 \frac{\mathcal{P}_1 \mathcal{P}_2}{b_2^2} \cdot \frac{\text{ch}(\mathcal{P}_1 (h_2 - z))}{\text{sh}(\mathcal{P}_1 h_2)} \cdot \frac{\text{ch}(\mathcal{P}_2 (h_2 - z))}{\text{sh}(\mathcal{P}_2 h_2)}}. \quad (7)$$

Неравномерность распределения тока (6) приводит к неравномерному распределению потерь мощности по сечению, Вт/м³:

$$P_{уд} = \delta_2^2 \rho_C = I_2^2 \frac{\rho_C \mathcal{P}_1 \mathcal{P}_2}{b_2^2} \cdot \frac{\text{ch}(\mathcal{P}_1 (h_2 - z))}{\text{sh}(\mathcal{P}_1 h_2)} \times \frac{\text{ch}(\mathcal{P}_2 (h_2 - z))}{\text{sh}(\mathcal{P}_2 h_2)}. \quad (8)$$

Средние удельные потери в стержне, Вт/м³:

$$P_{уд,ср} = [\text{sh}[(\mathcal{P}_2 - \mathcal{P}_1) h_2] (\mathcal{P}_1 + \mathcal{P}_2) - \text{sh}(\mathcal{P}_2 + \mathcal{P}_1) h_2] \times \frac{(\mathcal{P}_1 - \mathcal{P}_2) \mathcal{P}_1 \mathcal{P}_2 \rho_C I_2^2}{2h_2 b_2^2 \text{sh}(\mathcal{P}_1 h_2) \text{sh}(\mathcal{P}_2 h_2) (\mathcal{P}_2^2 - \mathcal{P}_1^2)} \quad (9)$$

Суммарные потери в стержне, Вт:

$$P_{ст,\Sigma} = h_2 b_2 l_{ст} P_{уд,ср}.$$

Определение распределения плотности тока и удельных потерь мощности по высоте паза выполнено для АД типа 2ЭДКОФ250М4 для привода скребкового конвейера со следующими характеристиками: номинальное напряжение $U_{ном} = 660В$; 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 $K_{об1} = 0,9$, ротора $K_{об2} = 1$; ток ротора, обусловленный проникновением плоской электромагнитной волны в глубокий паз, приведенный к обмотке статора с учетом вытеснения тока: $I_2 = 411,76 А$; значение не приведенного тока: $I_2 = I_2 \cdot K_r = 4213 А$; высота паза ротора $h_2 = 40 мм$; сечение паза ротора $S_2 = 166,96 мм^2$; длина паза ротора $l_2 = 270 мм$; удельное сопротивление алюминия при $t^\circ = 200^\circ C$ $\rho_c = 5,057 \cdot 10^{-8}, Ом \cdot м$.

Расчет параметров обмотки ротора без учета вытеснения тока и с учетом вытеснения произведен для случая замены существующего паза ротора на эквивалентный паз прямоугольного сечения с глубиной равной высоте зубца и сечением равным сечению паза ротора: высота стержня обмотки ротора $h_2 = 40 мм$; ширина стержня обмотки ротора $b_2 = S_2/h_2 = 4,17 мм$; среднее активное сопротивление $R_{20} = \rho_c \cdot l_2/S_2 = 8,177 \cdot 10^{-5}, Ом$; среднее индуктивное сопротивление $X_{20} = 7,9 \cdot 10^{-9} f_1 l_2 \lambda = 3,407 \cdot 10^{-4}, Ом$; $\lambda = h_2/(3b_2) = 3,194$ - удельная магнитная проводимость паза; глубина проникновения волны $\Delta = 1/\alpha = 16 мм$; эквивалентная высота паза $\zeta = h_2/\Delta = 2,5$; $K_r = 2,476$ и $K_x = 0,61$.

Неравномерное распределение мощности по высоте стержня, изменяющее температурное поле, повышает нагрев стержня в верхней части на $54^\circ C$. Результаты расчетов распределения плотности тока δ_2 и удельных потерь $p_{уд}$ приведены в табл. 1.

Для определения распределения температуры используется дифференциальное уравнение теплопроводности, которое устанавливает связь между временным и пространственным изменением температуры в любой точке тела, в котором происходит процесс теплопроводности [8]. Для двумерной задачи уравнение нестационарной теплопроводности имеет вид:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = \frac{P_{уд}}{C_p \gamma} + a \left(\frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} \right).$$

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

Частота f_2	$I_2=4213, A$	$Z=0, мм$	$Z=10, мм$	$Z=20, мм$	$Z=30, мм$	$Z=40, мм$	$P_{уд.ср.}$ Вт	$P_{см.Σ}$ Вт							
									50 Гц с учетом вытеснения тока	δ_2 А/мм ²	89,5	46,9	23,9	15,4	14,7
$1,0 \cdot 10^{-3}$ Гц без учета вытеснения	δ_2 А/мм ²	25,23					25,23	$P_{уд.}$ Вт/мм ³	32 $\cdot 10^{-3}$	0,032	1451				

Для моделирования поля используется метод сеток [9], стержень и зубец ротора разбиты на пять элементов (рис. 1).

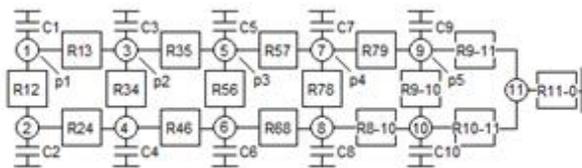


Рисунок 1 – Тепловая модель элемента пазовой зоны ротора:

точки 1, 3, 5, 7, 9 – стержень обмотки ротора;
 точки 2, 4, 6, 8, 10 – зубец ротора; точка 11 – пакет статора

Составим для данной тепловой схемы замещения уравнения:

$$C_1 \frac{d\Theta_1}{dt} + a_{11}\Theta_1 - a_{12}\Theta_2 - a_{13}\Theta_3 = p_1;$$

$$C_2 \frac{d\Theta_2}{dt} - a_{21}\Theta_1 + a_{22}\Theta_2 - a_{24}\Theta_3 = 0;$$

.....

$$C_{10} \frac{d\Theta_{10}}{dt} - a_{108}\Theta_8 - a_{109}\Theta_9 + a_{1010}\Theta_{10} - a_{1011}\Theta_{11} = 0.$$

Решением системы уравнений относительно температуры определяем распределение температуры по высоте стержня с учетом и без учета эффекта вытеснения тока. Результаты расчета сведены в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты теплового расчета температурного поля зоны ротора

Стержень с вытеснением тока							
Частота $f_2=50 Гц$, $I_2=4213 A$, $P_{ср}=3594 Вт$, $\tau=110 сек.$							
Точки схемы	1	3	5	7	9	Ср.	
Потери	99,1	123,8	276	803,4	2291		
Θ_i	$\tau=110 сек.$	570,7	582	604,3	635,6	666,2	611,8
$\Theta_i - \Theta_9$	$\tau=110 сек.$	-95,5	-84,2	-61,9	-30,6	0	-54,4
$\Theta_i - \Theta_{10}$	Уст. режим	34,3	32,1	27,6	18,7	0	22,7
Стержень без вытеснения тока							
Частота $f_2=1,0 \cdot 10^{-3} Гц$, $I_2=4213 A$, $P_{ср}=1451 Вт$, $\tau=110 сек.$							
Точки схемы	1	3	5	7	9	Ср.	
Потери	290,3	290,3	290,3	290,3	290,3		
Θ_i	$\tau=110 сек.$	252,1	251,1	249,4	247,7	246,1	249,3
$\Theta_i - \Theta_9$	$\tau=110 сек.$	6,0	5,0	3,3	1,5	0	3,2
$\Theta_i - \Theta_{10}$	Уст. режим	58,6	52,1	39,6	21,5	0	34,4

Выводы. 1. На основе теории плоской поляризованной электромагнитной волны впервые получены аналитические выражения распределения плотности тока и удельных потерь мощности по высоте стержня ротора АД с учетом поверхностного электрического эффекта.

2. В результате анализа влияния поверхностного электрического эффекта в стержне ротора можно установить, что при неизменном токе ротора он 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.

3. В установившемся режиме, при отсутствии вытеснения тока и токе ротора 4213 А: потери в стержне 1451Вт; перепад температуры по высоте стержня – 58,6 °С; максимальная температура имеет место на дне паза ротора; при несостоявшемся пуске при времени стоянки под током 110 с средняя температура – 249,3 °С.

4. В установившемся режиме при вытеснении тока и токе в роторе 4213 А: потери в стержне 3594 Вт; перепад температуры по высоте стержня – 34,3 °С; максимальная температура имеет место в глубине паза. При несостоявшемся пуске, при времени стоянки 110 с. средняя температур стержня - 611,8 °С; максимальная температура не на дне паза, а в стержне – со стороны воздушного зазора – 666,2 °С, что превосходит температуру плавления алюминия; перепад температуры по высоте –

95,5 °С. Из-за увеличения потерь мощности в стержне при вытеснении тока $P_a=3594$ Вт, по сравнению с потерями без вытеснения – $P_c=1451$ Вт, средняя температура стержня увеличилась на 363 °С. Неравномерное распределение мощности по высоте стержня, изменяющее температурное поле, повышает нагрев стержня в верхней части на 54 °С.

5. Неравномерное распределение тока в стержне приводит к повышению среднего нагрева стержня относительно температуры на поверхности ротора в 1,5 раза по сравнению со средним нагревом при равномерном распределении плотности тока. За время стоянки двигателя под током происходит не только возрастание температуры стержня но и распределение во времени.

6. Неравномерное распределение удельных потерь мощности приводит к изменению теплового сопротивления от точки со средней температурой стержня до поверхности ротора, а именно эквивалентного теплового сопротивления входящего в методики теплового расчета двигателей. Это сопротивление снижается для установившегося режима работы в 1,65 раза.

7. Влияние электрического поверхностного эффекта на распределение температурного поля ротора по высоте, удельных потерь и распределение плотности тока, влияющих на нагрев стержня, необходимо учитывать при разработке средств защиты асинхронных двигателей от перегревов и тем самым способствовать увеличению срока службы в эксплуатации, повышению их надежности в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ткачук А.Н., Аниканов А.И. Влияние режима работы скребкового конвейера на аварийность

приводного электродвигателя. // Взрывозащищенное электрооборудование. – Сб. науч. трудов УкрНИИВЭ. – Донецк: Юго-Восток, 2003. – С. 138-143.

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

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

4. Ширнин И.Г., Ткачук А.Н. Выплавление короткозамкнутой обмотки ротора двигателей горных машин. // Вісник СХУ ім. В.Даля. – 2005. – №3. – С. 143-148.

5. Ткачук А.Н., Челпанов А.С. Влияние неравномерности загрузки конвейеров на аварийность их приводных электродвигателей. // Взрывозащищенное электрооборудование. – Сб. науч. трудов УкрНИИВЭ. – Донецк: Юго-Восток, 2005. – С. 381-386.

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

7. Вольдек А.И. Электрические машины. Учебник для студ. высш. техн. заведений. – Л., «Энергия», 1974. – 840 с.

8. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел АС. Теплопередача. – М.: «Энергия», 1975. – 486 с.

9. Бурковский А.Н., Ковалев Е.Б., Коробов В.К. Нагрев и охлаждение электродвигателей взрывоопасного исполнения. – М.: Энергия, 1970.