

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;  $\omega = 2\pi f_s$  - угловая частота тока ротора;  $\gamma$  - проводимость ( $1/(Om \cdot m)$ );  $\mu_a$  - магнитная проницаемость ( $Гн/м$ ).

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

$$p_1 = (0,5\omega\mu_a)^{0,5} + j(0,5\omega\mu_a)^{0,5} = \alpha + j\beta, \quad (3)$$

и сопряженную ей

$$p_2 = (0,5\omega\mu_a)^{0,5} - j(0,5\omega\mu_a)^{0,5} = \alpha - j\beta. \quad (4)$$

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:

$$\mathcal{E} = -\frac{1}{\gamma} \frac{d\mathcal{H}}{dz} = \frac{p_1 I_2}{\gamma b_2} \frac{\text{ch}[p_1(h_2 - z)]}{\text{sh}(p_1 h_2)}. \quad (5)$$

Распределение плотности тока по высоте стержня:

$$\mathcal{J}_2 = \gamma \mathcal{E} = \frac{p_1 I_2}{b_2} \frac{\text{ch}[p_1(h_2 - z)]}{\text{sh}(p_1 h_2)}, \quad (6)$$

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

Модуль плотности тока  $\delta_2$  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  $p_1$  сопряженную величину  $p_2$  (4).

После подстановки и преобразований получим модуль плотности тока в виде, (А/м<sup>2</sup>):

$$\delta_2 = \sqrt{I_2^2 \frac{p_1 p_2}{b_2^2} \cdot \frac{\text{ch}(p_1(h_2 - z))}{\text{sh}(p_1 h_2)} \cdot \frac{\text{ch}(p_2(h_2 - z))}{\text{sh}(p_2 h_2)}}. \quad (7)$$

Неравномерность распределения тока (6) приводит к неравномерному распределению потерь мощности по сечению, Вт/м<sup>3</sup>:

$$P_{уд} = \delta_2^2 \rho_C = I_2^2 \frac{\rho_C p_1 p_2}{b_2^2} \cdot \frac{\text{ch}(p_1(h_2 - z))}{\text{sh}(p_1 h_2)} \times \frac{\text{ch}(p_2(h_2 - z))}{\text{sh}(p_2 h_2)}. \quad (8)$$

Средние удельные потери в стержне, Вт/м<sup>3</sup>:

$$P_{уд,ср} = [\text{sh}[(p_2 - p_1)h_2] (\mathcal{J}_1 + \mathcal{J}_2) - \text{sh}(p_2 + p_1)h_2] \times \frac{(p_1 - p_2) p_1 p_2 \rho_C I_2^2}{2h_2 b_2^2 \text{sh}(p_1 h_2) \text{sh}(p_2 h_2) (p_2^2 - p_1^2)} \quad (9)$$

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  $\delta_2$  и удельных потерь  $p_{уд}$  приведены в табл. 1.

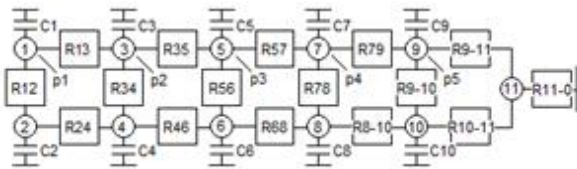
Для определения распределения температуры используется дифференциальное уравнение теплопроводности, которое устанавливает связь между временным и пространственным изменением температуры в любой точке тела, в котором происходит процесс теплопроводности [8]. Для двумерной задачи уравнение нестационарной 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  $\delta_2$  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	$\delta_2$ , А/мм <sup>2</sup>	89,5	46,9	23,9	15,4	14,7	25,23	$P_{уд.}$ , Вт/мм <sup>3</sup>
1,0·10 <sup>-3</sup> Гц без учета вытеснения	$\delta_2$ , А/мм <sup>2</sup>	25,23						25,23	$P_{уд.}$ , Вт/мм <sup>3</sup>	32·10 <sup>-3</sup>						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, $I_2=4213$ А, $P_{ср}=3594$ Вт, $\tau=110$ сек.							
Точки схемы	1	3	5	7	9	Ср.	
Потери	99,1	123,8	276	803,4	2291		
$\Theta_i$	$\tau=110$ 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, $I_2=4213$ А, $P_{ср}=1451$ Вт, $\tau=110$ сек.							
Точки схемы	1	3	5	7	9	Ср.	
Потери	290,3	290,3	290,3	290,3	290,3		
$\Theta_i$	$\tau=110$ 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.