

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСТАНОВИВШЕГОСЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ОБМОТКЕ РОТОРА С УЧЕТОМ ВЫТЕСНЕНИЯ ТОКА В ПАЗУ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

З використанням теорії електромагнітного поля для плоскої лінійної поляризованої хвилі, приводяться аналітичні дослідження розподілу температури в обмотці ротора асинхронних електродвигунів в стаціонарних режимах з урахуванням витіснення струму.

С использованием теории электромагнитного поля для плоской линейной поляризованной волны, приводятся аналитические исследования распределения температуры в обмотке ротора асинхронных электродвигателей в стационарных режимах с учетом вытеснения тока.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно [1] у асинхронных двигателей (АД) в режимах работы S4 температура стержней ротора достигает температуры плавления алюминия еще при номинальной температуре обмотки статора.

В [2] показано, что вследствие высокого нагрева обмотки ротора конвейерных двигателей необходимо ограничить число повторных пусков нагруженного конвейера до двух.

В [3] показано, что к недостаткам литых алюминиевых обмоток следует отнести появление воздушных включений, приводящих к возникновению раковин в пазах и кольцах, утончение и утяжка стержней, недоливы и т.п., что ухудшает параметры и снижает надежность АД. Кроме того, при больших перегрузках или частых пусаках происходит выплавление роторных стержней, что приводит к аварии АД. Практически короткозамкнутые обмотки роторов, получаемые путем заливки алюминием, неремонтопригодные.

Вследствие этого, диагностика литых короткозамкнутых обмоток является актуальной задачей.

Особую актуальность приобретает эта задача для обмоток с вытеснением тока, имеющих повышение потерь в обмотке при пуске и неравномерное распределение потерь по сечению обмотки, а, следовательно, повышенный нагрев стержней при пуске.

Однако существующие модели температурных реле [4 - 11] не оценивают температуру роторов АД.

Целью данной работы является исследование распределения температуры в обмотках ротора АД при нестационарных режимах с учетом вытеснения тока.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АНАЛИЗ

Влияние поверхностного эффекта на нагрев ротора зависит не только от его геометрии, но и от параметров двигателя в целом. Для анализа эффекта выберем в качестве модели один из наиболее распространенных электродвигателей - 2ЭДКОФ250 мощностью 55 кВт для привода скребкового конвейера.

В конструкциях реальных АД применяется большое разнообразие форм пазов ротора, поэтому для упрощения задачи и получения общих результатов рассмотрена обмотка с прямоугольным алюминиевым стержнем.

Распределение напряженности поля для плоской электромагнитной волны в прямоугольной шине, находящейся в пазу ротора изучено согласно [12].

Начало координат расположено в центре стержня по его ширине в воздушном зазоре между ротором и статором. Ось X направлена вдоль стержня, ось Y – по ширине паза и ось Z – от поверхности ротора ко дну паза (рис. 1).

Положим, что магнитная проницаемость пакета ротора бесконечна ($\mu = \infty$). При этом допущении индукция

в стали пакета будет конечной величиной, а напряженность поля будет стремиться к нулю.

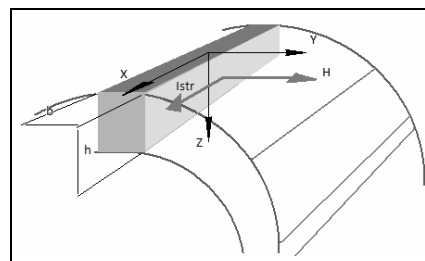


Рис. 1. Система координат

Вектор напряженности поля H направлен по оси Y, ЭДС E – по оси X, вектор Пойнтинга – по оси Z.

Дифференциальное уравнение для плоской электромагнитной волны:

$$\frac{d^2 \underline{H}_z}{dz^2} = j\omega\gamma_e \mu \underline{H}_z, \quad (1)$$

где \underline{H}_z – напряженность поля [А/м], комплексная величина, ω – угловая частота тока ротора, γ_e – электропроводность стержней ротора, [1/(Ом·м)].

Решение уравнения (1) в общем виде:

$$\underline{H}_z = \underline{C}_1 e^{\underline{p}z} + \underline{C}_2 e^{-\underline{p}z}, \quad (2)$$

где $\underline{p} = \sqrt{j\omega\gamma_e \mu}$, μ – магнитная проницаемость [Гн/м].

Подставив это выражение в (3) получим:

$$p_1 = \sqrt{\frac{\omega\gamma_e \mu}{2}} + j\sqrt{\frac{\omega\gamma_e \mu}{2}} = \alpha + j\beta, \quad (5)$$

$$\alpha = \beta = \sqrt{\frac{\omega\gamma_e \mu}{2}}. \quad (6)$$

Постоянные интегрирования \underline{C}_1 и \underline{C}_2 определяют из граничных условий в пазу ротора для проводника прямоугольного поперечного сечения шириной b и высотой h согласно закону полного тока с учетом того, что $\underline{H}_z = \underline{I}_{str}/b$ при $z = 0$, и $\underline{H}_z = 0$ при $z = h$:

$$\underline{C}_1 + \underline{C}_2 = \frac{\underline{I}_{str}}{b}; \quad (7)$$

$$\underline{C}_1 e^{\underline{p}h} + \underline{C}_2 e^{-\underline{p}h} = 0, \quad (8)$$

где \underline{I}_{str} – ток в обмотке (стержне) ротора.

Определив \underline{C}_1 и \underline{C}_2 из (7) и подставив их в (2) получим выражение для расчета распределения напряженности поля по высоте паза с учетом вытеснения тока:

$$\underline{H}_z = \frac{\underline{I}_{str}}{b} \frac{\text{Sh}[p_1(h-z)]}{\text{Sh}[p_1 h]}. \quad (9)$$

Электромагнитная волна проникает из зазора в шину через наружную поверхность стержня в воздушном зазоре машины и по мере проникновения в шину, будет затухать по амплитуде.

Распределение наведенной электромагнитной волной ЭДС по высоте паза ротора:

$$\underline{E}_z = -\frac{1}{\gamma_e} \frac{dH_z}{dz} = \frac{p_1 I_{str}}{\gamma_e b} \frac{\text{Ch}[p_1(h-z)]}{\text{Sh}(p_1 h)}. \quad (10)$$

Распределение плотности тока по высоте паза:

$$\underline{\delta}_z = \gamma_e \underline{E}_z = \frac{p_1 I_{str}}{b} \frac{\text{Ch}[p_1(h-z)]}{\text{Sh}(p_1 h)}. \quad (11)$$

В результате расчета по (11) получим комплексное выражение плотности тока.

Для определения действующей величины плотности тока воспользуемся выражением:

$$\delta_z = \sqrt{\delta_{zi} \delta_{zi}'}, \quad (12)$$

где δ_{zi}' – сопряженное комплексное значение плотности тока в стержне полученное из (11) подстановкой вместо p_1 сопряженной ей величины p_2 . После подстановки и преобразования получим:

$$\delta_z = \sqrt{I_{str}^2 \frac{p_1 p_2}{b^2} \left[\frac{\text{Ch}[p_1(h-z)]}{\text{Sh}(p_1 h)} \cdot \frac{\text{Ch}[p_2(h-z)]}{\text{Sh}(p_2 h)} \right]}. \quad (13)$$

Для определения средней плотности тока можно воспользоваться следующим выражением:

$$\delta_{z, \text{ср.}} = \frac{I_{str}}{hb}. \quad (14)$$

Неравномерность плотности тока приводит к неравномерному распределению потерь по сечению паза.

Для расчета удельных потерь необходимо воспользоваться следующим выражением:

$$q_{str} = \delta_z^2 \rho_e. \quad (15)$$

В результате преобразования (15) получим:

$$q_{str, z} = I_{str}^2 \frac{\rho_e p_1 p_2}{b^2} \left[\frac{\text{Ch}[p_1(h-z)]}{\text{Sh}(p_1 h)} \cdot \frac{\text{Ch}[p_2(h-z)]}{\text{Sh}(p_2 h)} \right]. \quad (16)$$

Зная распределение удельных объемных потерь по высоте стержня, определена их средняя величина. Средние удельные потери в стержне:

$$q_{str, z} = I_{str}^2 \frac{\rho_e p_1 p_2}{2hb^2} \times \frac{[\text{Sh}(p_2 - p_1)h](p_1 + p_2) - [\text{Sh}(p_2 + p_1)h](p_1 - p_2)}{\text{Sh}(p_1 h) \text{Sh}(p_2 h)(p_2^2 - p_1^2)}. \quad (17)$$

Суммарные потери в стержне:

$$P_{str} = q_{str, \text{ср.}} hbl. \quad (18)$$

Увеличение плотности тока в верхней части паза, приводящее к увеличению потерь в стержне паза, приведет к неравномерному нагреву стержня по высоте и к увеличению среднего нагрева стержня, а, следовательно, к повышению вероятности выплавления обмотки при тяжелых режимах работы двигателя.

В установившемся режиме распределение температур в элементах двигателя описывается уравнением Пуассона, с учетом граничных условий для рассматриваемого тела [13].

Температура стержня обмотки мало отличается от температуры зубца, около 1%, в связи с этим зубцовая зона ротора рассматривается, как стержень обмотки с эквивалентной теплопроводностью $\lambda_{\text{ЭКВ}}$. Тогда задача распределения температуры в стержне с учетом вытеснения тока, приводится к одномерной и для нее получено аналитическое решение.

Для упрощения задачи выполнен переход от цилиндрической системы координат к декартовой, где начало координат – в точке на поверхности ротора в воздушном зазоре.

Уравнение Пуассона в этом случае имеет вид:

$$\frac{d^2 \theta}{dz^2} = -\frac{q_{str, z}}{\lambda_{\text{ЭКВ}}}, \quad (19)$$

$$\lambda_{\text{ЭКВ}} = \frac{\lambda_{Fe} \cdot b_z + \lambda_{Al} \cdot b}{b_z + b}, \quad (20)$$

где b_z – ширина зубца в сечении.

Подстановкой распределения удельных потерь из (16) в (19) получено:

$$\frac{d^2 \theta}{dz^2} = -I_{str}^2 \frac{\rho_e p_1 p_2}{\lambda_{\text{ЭКВ}} b^2} \left[\frac{\text{Ch}[p_1(h-z)]}{\text{Sh}(p_1 h)} \cdot \frac{\text{Ch}[p_2(h-z)]}{\text{Sh}(p_2 h)} \right] \quad (21)$$

При этом градиент температуры будет равен:

$$\frac{d\theta}{dz} = s\Theta_z = \int q_{str, z} dz + s\Theta \cdot h. \quad (22)$$

Постоянная интегрирования $s\Theta_z$ определена при допущении, что отток тепла со дна паза ротора в спинку отсутствует. В этом случае при $z = h$ получим:

$$s\Theta_z = s\Theta_h + I_{str}^2 \frac{\rho_e p_1 p_2 (p_1 - p_2)}{2\lambda_{\text{ЭКВ}} b^2} \times \frac{\text{Sh}(p_2 - p_1)(h-z)(p_1 + p_2) - \text{Sh}(p_2 + p_1)(h-z)(p_1 - p_2)}{\text{Sh}(p_1 h) \text{Sh}(p_2 h)(p_2^2 - p_1^2)}. \quad (23)$$

Подставив эти данные в (22) получим, что $s\Theta_h = 0$.

Распределение температуры в стержне с учетом вытеснения тока определено из выражения:

$$\Theta_z = \int s\Theta_z dz + \Theta_0 = \Theta_{z1} + \Theta_0. \quad (24)$$

Подстановкой из (22) производной от температуры в (24) определено превышение температуры в любой точке стержня относительно температуры стержня в воздушном зазоре:

$$\Theta_{z1} = I_{str}^2 \frac{\rho_e p_1 p_2 (p_1 - p_2)^2}{2\lambda_{\text{ЭКВ}} b^2} \times \frac{\text{Sh}(p_2 - p_1)(h-z)(p_1 + p_2)^2 - \text{Sh}(p_2 + p_1)(h-z)(p_1 - p_2)^2}{\text{Sh}(p_1 h) \text{Sh}(p_2 h)(p_2^2 - p_1^2)}. \quad (25)$$

Постоянная интегрирования Θ_0 определена при $\Theta_z = 0$ при $z = 0$:

$$\Theta_0 = -I_{str}^2 \frac{\rho_e p_1 p_2 (p_1 - p_2)^2}{2\lambda_{\text{ЭКВ}} b^2} \times \frac{\text{Sh}[(p_2 - p_1)h](p_1 + p_2)^2 - \text{Sh}[(p_2 + p_1)h](p_1 - p_2)^2}{\text{Sh}(p_1 h) \text{Sh}(p_2 h)(p_2^2 - p_1^2)}. \quad (26)$$

Окончательная формула расчета распределения температуры стержня обмотки ротора с учетом вытеснения тока в пазу:

$$\Theta_z = \Theta_{z1} + \Theta_0, \quad (27)$$

где Θ_{z1} определено по (24), а Θ_0 – по (26).

Для анализа влияния вытеснения тока на температуру стержня аналогично определена температура стержня при равномерном распределении потерь по сечению, а именно в первую очередь градиент температуры:

$$s\Theta_{0z} = \int \frac{-q_0}{\lambda_{\text{ЭКВ}}} dz = \frac{-q_0}{\lambda_{\text{ЭКВ}}} z + s\Theta_{00}, \quad (27)$$

где q_0 – удельные потери в стержне обмотки ротора без вытеснения тока.

Положим, что при $z = h$ будут иметь место ра-

венства: $s\Theta_{0z} = 0$ и $s\Theta_{00} = q_0 \cdot h / \lambda_{\text{эКВ}}$. Тогда:

$$s\Theta_{0z} = \frac{q_0}{\lambda_{\text{эКВ}}} (h - z). \quad (28)$$

Распределение температуры по высоте стержня определено из выражения:

$$\Theta_{0z} = \int \frac{q_0(h-z)}{\lambda_{\text{эКВ}}} dz = \frac{q_0(2h-z)}{2\lambda_{\text{эКВ}}} z + \Theta_{00}, \quad (29)$$

Исходя из условия $\Theta_z=0$ при $z=0$, $\Theta_{00}=0$, имеем:

$$\Theta_{0z} = \frac{q_0(2h-z)}{2\lambda_{\text{эКВ}}} z. \quad (30)$$

Средняя температура стержня при равномерном распределении:

$$\Theta_{0z, \text{ср.}} = \frac{1}{h} \int_0^h \Theta_{0z} dz = \frac{h^2}{3} \frac{q_0}{\lambda_{\text{эКВ}}}. \quad (31)$$

Распределение по высоте стержня установившегося превышения эквивалентной температуры в стержне обмотки ротора над температурой поверхности ротора при установившемся токе короткого замыкания стержня 4213 А и частоте 50 Гц, с вытеснением и без вытеснения, приведено на рис. 2. Кривая $\Theta_z(z)$ – с учетом вытеснения тока, $\Theta_{0z}(z)$ – без вытеснения тока.

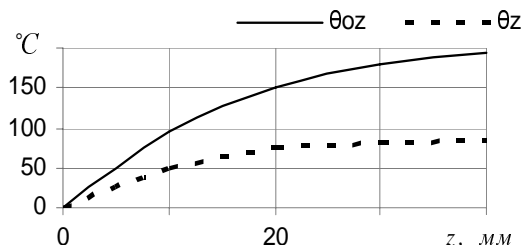


Рис. 2. Распределения температуры по высоте стержня с учетом и без учета вытеснения

Среднее превышение температуры стержня без вытеснения $\Theta_{0z, \text{ср.}} = 128^\circ\text{C}$. Среднее превышение температуры стержня с вытеснением $\Theta_{z, \text{ср.}} = 62^\circ\text{C}$.

Максимальное превышение температуры стержня без вытеснения на дне паза 193°C . Максимальное превышение температуры стержня с вытеснением на дне паза 78°C .

Тепловые сопротивления, от точки в стержне со средней температурой до точки на поверхности ротора для равномерного распределения потерь в стержне:

$$R_{str_0} = h / (3 \cdot b \cdot l \cdot \lambda_{\text{эКВ}}) = 0,04.$$

Для стержня с вытеснением тока:

$$R_{str} = \Theta_{\text{ср.}} / P_{\text{ср.}} = 0,02.$$

ВЫВОДЫ

Вытеснение тока в стержне обмотки ротора АД вызывает явления, зависящие от частоты тока в стержне. В частном случае при $f_2 = 50$ Гц:

1. Неравное распределение плотности тока, а, следовательно, удельных потерь по высоте стержня.

2. Неравномерное распределение плотности потерь по высоте стержня и температурного поля стержня.

3. Поскольку температура стержня обмотки мало отличается от температуры зубца, зубцовая зона ротора рассматривается, как стержень обмотки, имеющий эквивалентную теплопроводность. Тогда, распределение температуры в стержне ротора АД с учетом вытеснения тока, описываемое уравнением Пуассона, можно привести к одномерной и получить для нее аналитическое решение.

4. Неравномерное распределение плотности тока, а, следовательно, удельных потерь по высоте стержня,

а именно приближение максимальных потерь к поверхности ротора, приводит к уменьшению теплового сопротивления стержня от его среднего значения в 2 раза в точке на поверхности ротора. Во столько же раз снижается при постоянных суммарных потерях и средняя температура стержня.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ткачук А.Н., Аниканов А.И. Влияние повышения энерговооруженности скребковых конвейеров на аварийность их приводных электродвигателей. // Взрывозащищенное электрооборудование.- Сборник научных трудов УкрНИИВЭ.- 2003.- С. 126-134.
2. Шейко В.Г., Гармаш О.Н., Шейко С.Г. Влияние пуска двигателей 2ЭДКОФ250LD4 и 2ЭДКЛОФЛВ4 в приводе конвейера на температуру стержней ротора. // Взрывозащищенное электрооборудование.- Сборник научных трудов УкрНИИВЭ.- 2003.- С. 88-93.
3. Аниканов А.И., Каика В.В., Ткачук Н.Н., Ткачук А.Н., Кондратьев А.Е., Кирьянов В.В. Конструкция и технология изготовления роторных стержневых обмоток. // Взрывозащищенное электрооборудование.- Сборник научных трудов УкрНИИВЭ.- 2005.- С. 213-223.
4. Беспалов В.Я., Мошинский Ю.А., Цуканов В.И. Упрощенная математическая модель нестационарного нагрева и охлаждения обмотки статора асинхронного двигателя. // "Электричество", 2003, №4, С. 20-26.
5. Бирг А.Н., Дмитриев В.Н., Надель Л.А. Реле защиты двигателя на базе однокристалльной микро-ЭВМ КМ1813BE1 // Материалы семинара "Микропроцессоры и средства вычислительной техники в новых разработках". Чебоксары, 1989.
6. Бугаев Г.А., Леонтьев А.И., Ерохин Е.Ю. Павлов Д.А. / Математические модели нагрева и охлаждения асинхронных двигателей для микропроцессорного реле тепловой защиты.- Электротехника. 2001, №2. С. 51-54.
7. Вареник Е.А., Федоров М.М., Денник В.Ф. Прогнозирование теплового состояния обмоток выпускаемых асинхронных двигателей в повторнократковременных режимах работы. // Взрывозащищенное электрооборудование.- Сборник научных трудов УкрНИИВЭ.- 2004.- С. 179-183.
8. Егоров Е.Г., Гений В.С., Михайлов Н.М., Яковлев С.К. Микропроцессорное реле тепловой защиты асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором // Электротехника. №1. 1997, С. 53—55.
9. Момот В.Е., Михайлов С.Л., Осадчук Ю.Г. Построение адаптивных систем защиты электрических машин при аномальных режимах работы // Днепропетровск. Сборник научных трудов РИК НГА Украины. 2001. №11. Том. 2. с. 254.
10. Синчук О.Н., Чумак В.В., Михайлов С.Л. Тепловая модель кранового АД для диагностирования и настройки цифровой защиты от перегрузок. / Электротехника. 2003, №3. С. 61-65.
11. Федоров М.М., Малеев Д.М. Применение микропроцессорных систем для контроля и прогнозирования теплового состояния асинхронных двигателей // Збірник наукових праць ДонДТУ, серія "Електротехніка і енергетика", вип. 21, Донецьк –2000, С. 133-136.
12. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. - "Гардарики", М.: 2003. 316 с.
13. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. Энергия. М.: 1975. С. 486.

Поступила 11.05.2009

Гусаров Алексей Андреевич, аспирант,
Ковалев Евгений Борисович, д.т.н., проф.
Донецкий национальный технический университет
Украина, 83001, Донецк, ул. Артема, 58, ДонНТУ,
кафедра "Электромеханики и ТОЭ", тел. (062) 301-03-29.