

УДК 621.313.333.018.

Ан.А. Гусаров, Ал.А. Гусаров, Е.Б. Ковалев.Донецкий национальный технический университет, г.Донецк
кафедра горной электротехники и автоматики**ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ В ОБМОТКЕ ГЛУБОКОПАЗНОГО РОТОРА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПРИ НЕСОСТОЯВШЕМСЯ ПУСКЕ.****Аннотация**

Гусаров А.А., Ковалёв Е.Б., Гусаров А.А. Температурное поле в обмотке глубокопазного ротора асинхронного двигателя при несостоявшемся пуске. На основе использования теории электромагнитного поля для плоской электромагнитной волны, уравнения теплопроводности и метода конечных разностей приводятся аналитические исследования распределения температуры в обмотке ротора асинхронных электродвигателей с глубокими прямоугольными пазами при несостоявшемся пуске с учетом вытеснения тока.

Ключевые слова: плоская электромагнитная волна, нагревание обмотки, асинхронный двигатель, нестационарный метод.

Общая постановка проблемы.

Приводам в угольной промышленности с асинхронными двигателями, свойственны случайные во времени и нестабильной по средней величине нагрузки с частыми пусками. Для повышения сроков службы двигателей в этих условиях они снабжены температурной защитой, отключающей двигатель при превышении обмоткой статора температуры, установленной ГОСТ 27888, но обмотки короткозамкнутого ротора защиты не имеют.

Поэтому имеются случаи выплавления алюминиевых роторов электродвигателей приводов конвейеров и угольных комбайнов. Для предотвращения этого, в конвейерных двигателях [7] ограничивается число повторных пусков нагруженного конвейера до двух.

Для решения проблемы надежности роторов применяют обмотки залитые медью, но сложности изготовления ограничивает их применение, поэтому защита роторов с алюминиевой обмоткой является актуальной.

Существующие модели температурных реле [1], [3], [6] не оценивают температуру роторов асинхронных электродвигателей.

Для разработки температурных реле, позволяющих защищать обмотки роторов, необходимо определять максимальные температуры и скорости нарастания температур в обмотке в нестационарных режимах.

Цель работы.

Исследование скорости нарастания и распределения температур в короткозамкнутых обмотках роторов асинхронных электродвигателей в нестационарных режимах с учетом вытеснения тока. Влияние вытеснения тока в роторе на его нагрев зависит не только от геометрии ротора, но и от параметров двигателя в целом. Для анализа влияния вытеснения тока в пазах ротора на его нагрев выберем в качестве модели один из наиболее распространенных двигателей – электродвигатель для привода скребкового конвейера 2ЭДКОФ250М4 мощностью 55 кВт.

В реальных двигателях мы имеем большое разнообразие в форме пазов ротора, поэтому для упрощения задачи и получения общих результатов рассмотрим обмотку с прямоугольным алюминиевым стержнем. Распределение температуры для различных стержней и граничных условий 3 рода при равномерном и сосредоточенном тепловыделении рассмотрено в [4].

В нашем случае мы имеем граничные условия охлаждения стержня четвертого рода со всех поверхностей, кроме открытого шлица паза в его верхней части, где граничные условия третьего рода, а также неравномерное распределение потерь по высоте стержня, вызванное эффектом вытеснения тока. Сделаем расчет и анализ такого варианта задачи.

Распределение напряженности поля для плоской электромагнитной волны в прямоугольной стержне, находящемся в пазу ротора согласно рассмотрено в [2].

Расположим начало координат в центре стержня по его ширине на поверхности стержня в воздушном зазоре между ротором и статором.

Направим ось X вдоль стержня, оси Y – по ширине паза и Z от поверхности ротора ко дну паза.

Положим магнитную проницаемость пакета ротора: $\mu_g = \infty$.

При этом допущении индукция в стали пакета будет конечной величиной, а напряженность поля будет стремиться к нулю.

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

Дифференциальное уравнение для плоской электромагнитной волны:

$$\delta^2 H_z / \delta \zeta^2 = \varphi * \omega * \gamma \epsilon * \mu * H_z \quad (1)$$

где H_z - напряженность поля [A/м].

Решение уравнения (1) в общем виде:

$$H_z = X1 * \epsilon^{\langle 1 * \zeta} + X2 * \epsilon^{-\langle 1 * \zeta} \quad (2)$$

$$\alpha 1 = (\varphi * \omega * \gamma \epsilon * \mu)^{0.5} = \alpha + \varphi * \alpha \quad (3)$$

$$\varphi^{TM\Sigma}: \alpha = (\omega * \gamma \epsilon * \mu / 2)^{0.5} \quad (4)$$

$\gamma \epsilon$ - проводимость [1/(Ом * м)],

μ - магнитная проницаемость [Гн/ м],

Постоянные интегрирования C1 и C2 определим из граничных условий для прямоугольного проводника в пазу ротора:

Согласно закону полного тока:

1. При $z=0$ – $H_z = I \sigma \tau p / \beta \pi$.

2. При $z=\eta \zeta$ – $H_z = 0$

Подставив в (2) получим:

$$X1 + X2 = I \sigma \tau p / \beta \pi \quad (5)$$

$$X1 * \epsilon^{\langle 1 * \eta \zeta} + X2 * \epsilon^{-\langle 1 * \eta \zeta} = 0 \quad (6)$$

Определив C1 и C2 из (5) и подставив их в (2) получим выражение для расчета распределения напряженности поля по высоте паза:

$$H_z = I \sigma \tau p / \beta \pi * \sigma \eta [(1 * (\eta \zeta - \zeta)) / \sigma \eta (\langle 1 * \eta \zeta)] \quad (7)$$

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

Распределение ЭДС, наведенной электромагнитной волной по высоте стержня ротора:

$$E_z = -1 / \gamma \epsilon * \delta H / \delta \zeta = \langle 1 * I \sigma \tau p / (\gamma \epsilon * \beta \pi) * \chi \eta [(1 * (\eta \zeta - \zeta)) / \sigma \eta (\langle 1 * \eta \zeta)] \quad (8)$$

Распределение плотности тока по высоте паза ротора:

$$\delta z_1 = \gamma \epsilon * E_z = \langle 1 * I \sigma \tau p / (\beta \pi) * \chi \eta [(1 * (\eta \zeta - \zeta)) / \sigma \eta (\langle 1 * \eta \zeta)] \quad (9)$$

В результате расчета по (9) получим комплексное выражение плотности тока.

Для определения действующей величины плотности тока воспользуемся выражением:

$$\delta z = \sqrt{\delta z_1 * \delta z_1^*} \quad (10)$$

где δz_1 – сопряженное комплексное значение плотности тока в стержне δz_1 полученное из (9) подстановкой вместо $\alpha 1$ сопряженную ей величину $\alpha 2$. После подстановки и преобразования получим:

$$\delta z = \sqrt{Istr^2 * \frac{\alpha 1 * \alpha 2}{bp^2} \left[\frac{ch[\alpha 1 * (hz - z)]}{sh(\alpha 1 * hz)} * \frac{ch[\alpha 2 * (hz - z)]}{sh(\alpha 2 * hz)} \right]} \quad (11)$$

Для определения средней плотности тока можно воспользоваться следующим выражением:

$$\delta zcp = Istr / hz * bp \quad (12)$$

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

Для расчета удельных потерь необходимо воспользоваться следующим выражением:

$$qstrz = \delta z^2 * \rho e \quad (13)$$

В результате преобразования выражения (13) получим:

$$qstrz = Istr^2 * \frac{\alpha 1 * \alpha 2 * \rho e}{bp^2} * \left[\frac{ch[\alpha 1 * (hz - z)]}{sh(\alpha 1 * hz)} * \frac{ch[\alpha 2 * (hz - z)]}{sh(\alpha 2 * hz)} \right] \quad (14)$$

Зная распределение удельных объемных потерь по высоте стержня можно определить их среднюю величину.

Средние удельные потери в стержне:

$$qstrcp = \frac{Istr^2 * \alpha 1 * \alpha 2 * \rho e * \{sh[(\alpha 2 - \alpha 1)] * hz * (\alpha 1 + \alpha 2) - sh[(\alpha 1 + \alpha 2) * hz] * (\alpha 1 - \alpha 2)\}}{2 * hz * bp^2 * sh(\alpha 1 * hz) * sh(\alpha 2 * hz) * (\alpha 2^2 - \alpha 1^2)} \quad (15)$$

Суммарные потери в стержне:

$$Pstrsum = qstrcp * hz * bp * l \quad (16)$$

Температуру стержня определим из решения дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности, устанавливающего связь между временным и пространственным изменением температуры в любой точке тела, в котором происходит процесс теплопроводности [4] и граничных условий для рассматриваемой пластины. Для нашей двухмерной задачи уравнение нестационарной теплопроводности имеет вид:

$$\partial \theta / \partial t = q / cv * \gamma m + a * (\partial^2 \theta / \partial x^2 + \partial^2 \theta / \partial y^2) \quad (17)$$

где $a = \lambda / cv * \gamma m$ коэффициент температуропроводности [м²/сек]; γm - плотность [кг/м³]. cv - теплоемкость [кДж / (кг * °С)]

Для решения уравнения воспользуемся методом конечных разностей [2], для чего разобьем стержень и прилегающий к нему зубец ротора на пять элементов каждый.

Тепловая модель элемента ротора стержень обмотки – зубец ротора приведена на рисунке 1, где точки 1, 3, 5, 7, 9 – стержень обмотки ротора, очки 2, 4, 6, 8, 10 – зубец ротора, точка 11 – пакет статора.

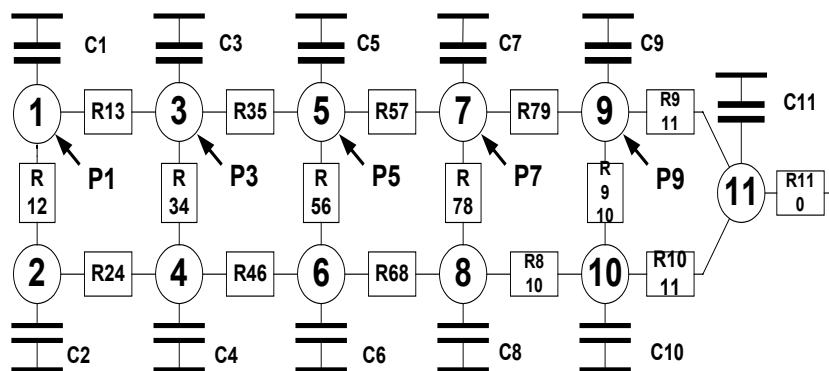


Рисунок 1 – Тепловая модель элемента ротора

При составлении схемы замещения примем следующие допущения:

1. Теплопередачей к спинке ротора пренебрежем.
 2. Потери в обмотке не зависят от температуры.
 3. В качестве внешней среды для моделирования поля введена 12 точка соответствующая температуре воздуха в воздушном зазоре между ротором и статором, т.е. для области моделирования воздушном зазоре приняты граничные условия третьего рода .
 4. Для получения реальной картины поля температуры в зубцовой зоне ротора в схему моделирования введено дополнительное сопротивление $R_{11,0}$ равное эквивалентному тепловому сопротивлению от точки в воздушном зазоре машины до окружающей среды.
 5. Поскольку температура воздуха в зазоре нас не интересует для упрощения задачи звезда сопротивлений $R_{9,12}$, $R_{10,12}$ и $R_{12,11}$ преобразована в треугольник сопротивлений $R_{9,11}$, $R_{10,11}$ и $R_{9,10}$, точка 12 опущена. Составим для данной схемы замещения уравнения [2].
- Исходная система дифференциальных уравнений в матричном виде может быть записана в форме Коши:

$$s\theta_i = A_{cij} * \theta_j + P_{ci}, \tag{22}$$

где A_{cij} — матрица, элементы которой $a_{ij} = a_{ij} / C_i$; a_{ij} - тепловые проводимости между элементами схемы; C_i – теплоемкости элементов схемы; P_{ci} — матрица столбец элементы которого $P_{ci} = P_i / C_i$; P_i – потери в i – х элементах схемы; θ_i — матрица столбец неизвестных температур.

Тепловые сопротивления определяются в соответствии с [2] [5].

Результаты исследования. Расчет распределения вытеснения тока проведен для режима несостоявшегося пуска электродвигателя 2ЭДКОФ 250 М4 т.е. при частоте 50 Гц, токе статора $I_2'_{kсоп} = 411.76$ А. и соответствующему ему току стержня $I_{2strks}=4213$ А.

Подставив необходимые данные в (9) получим комплексную плотность тока в стержне, а в (11) – действующую величину.

Действующая величина этой плотности на рисунке 2.

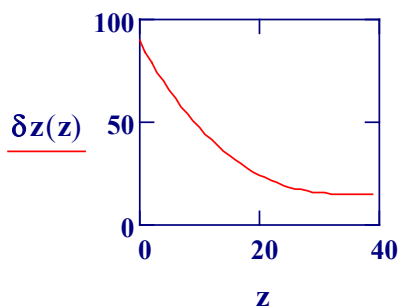


Рисунок 2 – Распределение плотности тока по высоте стержня ротора

Вследствие вытеснения тока в пазу ротора максимальная плотность тока в верхнем слое паза превосходит плотность тока у дна паза в 6 раз и, при средней плотности тока 25.23 А/мм², составляет $89,52$ А/мм². Распределение удельных потерь по высоте стержня, определенных согласно (14), приведено на рисунке 3.

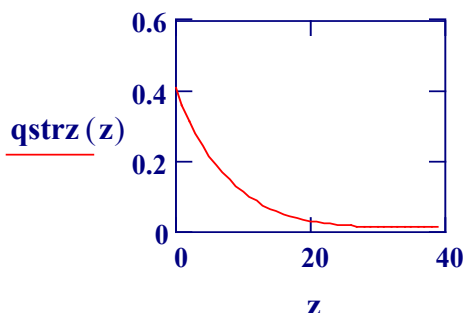


Рисунок 3 – Распределение удельных потерь по высоте стержня

Вследствие вытеснения тока в пазу ротора, максимальные потери в верхнем слое паза, при средних удельных потерях $79.7 \cdot 10^{-3}$ Вт/мм³, составляют $405 \cdot 10^{-3}$ Вт/мм³ и превосходят потери у дна паза в 37 раз. Суммарные потери в стержне, определенные согласно (18), составляют 3594 Вт и в 2,5 раза превышают потери при равномерном распределении тока по сечению паза, (при отсутствии вытеснения и токе ротора $I_{2strks} = 4213$ А потери в стержне составляют 1451 Вт). Результаты определения перепада температуры в стержне во времени приведены на рисунке. 4.

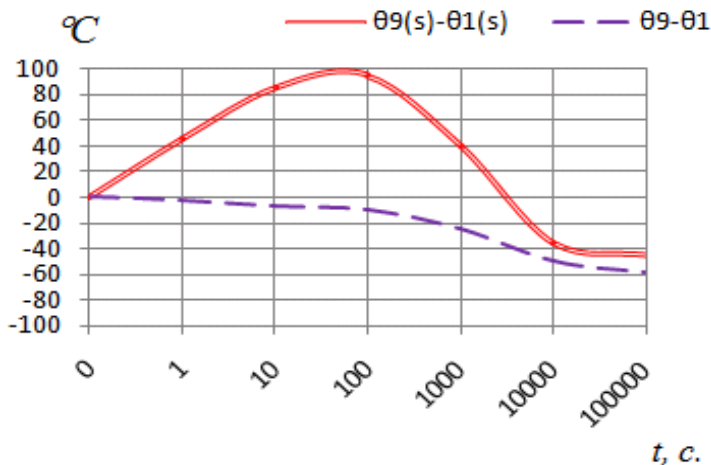


Рисунок 4 – Результаты определения перепада температуры в стержне во времени

Как видно из рисунка 4, в процессе стоянки под током не только возрастает температура стержня, но происходит перераспределение температуры по его высоте, а именно, при времени стоянки под током до 4000 сек максимальная температура в стержне имеет место на кромке стержня в зазоре, рисунок. 5, где $\theta_{stri110}$ - температура стержня при времени стоянки под током 110 сек; $\theta_{stri4000}$ – температура стержня при времени стоянки под током 4000 сек; Θ_{stri} – температура стержня в установившемся режиме.

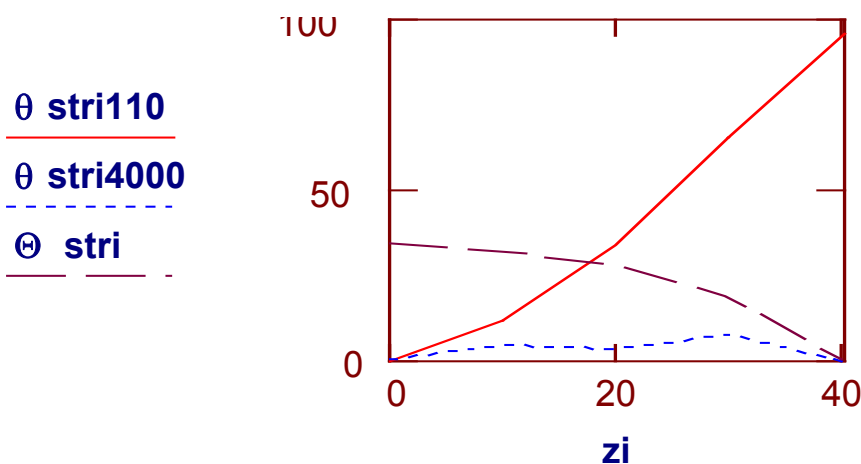


Рисунок 5 – Перераспределение температуры в стержне во времени

Начало координат на дне паза. При времени стоянки под током в зоне 4000 сек мы имеем незначительный перепад температуры по высоте стержня, т.е. практически равномерное распределение температуры.

В установившемся режиме максимальная температура стержня перемещается на дно паза.

Распределение температуры по высоте стержня при несостоявшемся пуске и времени стоянки под током 110 сек приведено на рисунке. 6.

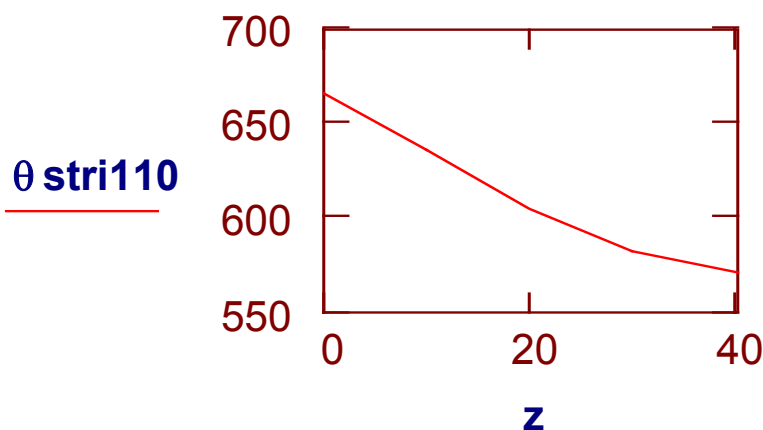


Рисунок 6 – Распределение температуры по высоте стержня при несостоявшемся пуске

Время выбрано таким, при котором максимальная температура стержня (на кромке стержня в зазоре) $\theta_{max} = 666.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ несколько превосходит температуру плавления алюминия, $\theta_{пл} = 660.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Выводы.

В результате определения температуры в стержне с вытеснением тока ротора $I_{2strks}=4213 \text{ A}$ и потерями в стержне 3594 Вт, несостоявшемся пуске и времени стоянки под током 110 сек установлено:

1. Увеличение, за счет вытеснения тока, потерь в стержне до 3594 Вт по сравнению с потерями при равномерном распределении тока 1451 Вт увеличивает среднюю температуру стержня с $249.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ на $362.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ в результате чего, средняя температура стержня ротора двигателя, с вытеснением тока составляет $611.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

2. Перепад температуры по высоте стержня составляет $95.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

3. Средняя температура зубца ротора составляет $605.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

4. Такое распределение температур в обмотке ротора позволяет, при расчете средних температур и при вытеснении тока, рассматривать зубцовую зону ротора как единое целое и не рассматривать перепады температур в тангенциальном направлении зубцовой зоны.

6. Максимальная температура стержня находится на кромке стержня в зазоре и составляет $666.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, что превосходит температуру плавления алюминия.

7. В установившемся режиме перепад температуры по высоте стержня снижается до $33.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

8. Такое положительное явление не используется в нашем случае, т.к. выплавление стержня ротора произойдет при времени стоянки под током меньшем чем 110 сек, т.е. до благоприятного перераспределения температуры стержня.

9. Однако при частотном пуске двигателя от полупроводникового преобразователя частоты картина может измениться.

10. Трудно подтвердить экспериментально полученные результаты, можно только отметить, что результаты расчета температуры стержня в номинальном режиме соответствуют результатам испытания двигателя 2ЭДКОФ250М4 взятого за основу создания модели.

Литература

1. Беспалов В.Я., Мощинский Ю.А., Цуканов В.И. Упрощенная математическая модель нестационарного нагрева и охлаждения обмотки статора асинхронного двигателя./ «Электричество», 2003, №4, с. 20-26.
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. - "Гардарика", М.: 2003. 316 с.
3. 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.
4. Гуревич Э.И. Переходные процессы в электрических машинах. Л.: Энергоатомиздат. 1983.- 216 с.
5. Ковалев Е.Б. Бурковский А.Н., Голянд Б. С. Методика тепловых расчетов взрывонепроницаемых электродвигателей // Электропромышленность 1970,- № 1.
6. 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.
7. 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.

Annotation

Gusarow A.A., Gusarow A.A., Kovalev E.B. Distributing of temperature of puttees of rotor of asynchronous electric motors are brought in the unstationary. *With the use of theory of the electromagnetic field for the flat linear polarized wave, researches over of distributing of temperature of puttees of rotor of asynchronous electric motors are brought in the unstationary modes taking, into account expulsing of current.*

Key words. *Flat hertzian wave, heating of puttee, asynchronous engine, unstationary mode.*

Анотація

Гусаров О.А., Ковальов Є.Б., Гусаров А.О. Температурне поле в обмотці ротору асинхронного електродвигуна при пуску, що не відбувся. *На основі використання теорії електромагнітного поля для плоскої електромагнітної хвилі, рівняння теплопровідності і методу кінцевих різниць приводяться аналітичні дослідження розподілу температури в обмотці ротора асинхронних електродвигунів з глибокими прямокутними пазами при пуску, що не відбувся, з урахуванням витіснення струму.*

Ключові слова. *Плоска електромагнітна хвиля, нагрівання обмотки, асинхронний двигун, нестационарний метод.*

Здано в редакцію:
22.02.2010р.

Рекомендовано до друку:
д.т.н, проф. Заболотний І. П.