

УДК 621.313.32

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА РОТОРА НА РАБОЧИЕ И ПУСКОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЛУБОКОПАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Сивокобыленко В.Ф., д.т.н, проф., Ткаченко С.Н., аспирант

Донецкий национальный технический университет

83000, г. Донецк, ул. Артема, 55

E-mail: svf@elf.dgtu.donetsk.ua, tsnars@skif.net

Розглянуто вплив температури нагрівання ротора асинхронного глибокопазного електродвигуна на пускові і робочі характеристики. Для розрахунку характеристик машини використалися одноконтурна і двоконтурна схеми заміщення, які враховують ефект витиснення струму в роторі. Скореговано методику обліку температури нагрівання ротора і явища ефекту витиснення струму для одноконтурної й двоконтурної схем заміщення двигуна.

Ключові слова: глибокопазний асинхронний електродвигун, пускові і робочі характеристики, нагрівання ротора, момент, ефект витиснення струму, двоконтурна схема заміщення.

The influence of rotor heating temperature of induction motor with deep slots on starting and working characteristics is described in this article. As a basis for the calculation of machine characteristics the single- and two-loop equivalent circuits have been used, the rotor current displacement is taken into account. The method of account of heating rotor temperature and current displacement effect for the single- and two-loop equivalent circuits of the motor is adjusted.

Key words: induction motor with deep slots, start and work characteristics, rotor heating, torque, current, two-loop equivalent circuit.

Введение. На сегодняшний день основным видом электропривода механизмов промышленных предприятий, собственных нужд тепловых и атомных электростанций являются асинхронные электродвигатели (АЭД) с короткозамкнутым ротором. Отличительной особенностью АЭД является простота и надежность конструкции по сравнению с другими видами машин переменного тока. АЭД обычно рассчитываются на срок эксплуатации от 15 до 20 лет без проведения капитального ремонта. Обязательным условием выработки машиной эксплуатационного срока, заявляемого заводом-изготовителем, является работа при номинальных (каталожных) параметрах, указываемых в паспорте. Однако, в реальных рабочих условиях имеют место весьма существенные отклонения от требуемых номинальных режимов эксплуатации. К числу таких отклонений следует отнести: плохое качество питающего напряжения (присутствие в сети высших гармоник, несимметрия напряжения); выход из строя системы охлаждения АЭД (загрязнение вентиляционных каналов, выход из строя системы принудительной циркуляции); нарушение правил технической эксплуатации (технологические перегрузки, неудовлетворительные условия окружающей среды, такие как, повышенная влажность воздуха, агрессивная среда и резкие перепады температуры).

Следует сделать вывод о том, что все вышеперечисленные отклонения являются причиной аварийных режимов (короткие замыкания в обмотке статора и на выводах; однофазные замыкания на землю в обмотке статора; перегрев короткозамкнутого ротора, обмотки и сердечника статора вследствие пере-

грузки; обрыв стержней короткозамкнутого ротора; перегрев элементов статора и ротора токами обратной последовательности; перегрев элементов машины вследствие заклинивания ротора), приводящих к увеличению температуры изоляции обмоток и соответственно к ее старению. Справедливо отметить, что фактором, определяющим срок службы машины, является температура нагрева машины, поэтому представляется необходимым проанализировать влияние температуры нагрева глибокопазного короткозамкнутого ротора и эффекта вытеснения тока на пусковые и рабочие характеристики АЭД. Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что определение нагрева обмоток статора и ротора в указанных режимах является актуальным.

Анализ предыдущих исследований. В работах [1-3] приведены данные о влиянии эффекта вытеснения тока в роторе на пусковые и рабочие характеристики глибокопазных АЭД. Однако в технической литературе влияние нагрева обмоток ротора на эти характеристики исследовано не достаточно.

Цель работы. Анализ влияния температуры нагрева ротора на пусковые и рабочие характеристики глибокопазного асинхронного двигателя.

Материал и результаты исследования. В настоящее время анализ пусковых и рабочих характеристик глибокопазных АЭД производится с использованием Т-образных одноконтурной и двухконтурной схем замещения, приведенных на рисунках 1 и 2 соответственно. Параметры цепей статора и ветви намагничивания у них совпадают, отличие состоит в учете эффекта вытеснения тока в роторе, имеющего место в машинах с глибокопазным ротором, рото-

ром с двойной беличьей клеткой, а также с ротором, имеющим различную форму паза (трапециевидный паз, бутылочный паз и т.п.).

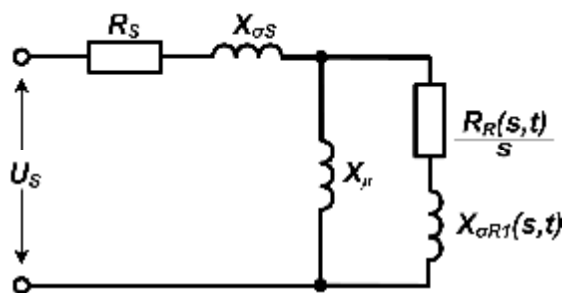


Рисунок 1 – Схема замещения асинхронного двигателя с одним контуром на роторе

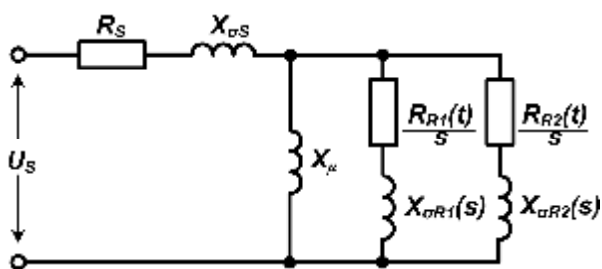


Рисунок 2 – Схема замещения асинхронного двигателя с двумя контурами на роторе

При использовании одноконтурной схемы замещения принимается допущение, что явление вытеснения тока имеет место только в пазовой части ротора асинхронной машины и отсутствует в короткозамыкающих кольцах [3, 4]. При этом активное и индуктивное сопротивления ротора во всем диапазоне изменения скорости вращения в зависимости от температуры нагрева ротора можно выразить следующим образом (здесь и далее сопротивления приведены в относительных единицах):

$$R_R(s, t) = (R_{RB} + kr(s, t) \cdot R_{RC}) \cdot \rho(t); \quad (1)$$

$$X_{\sigma R}(s, t) = X_{\sigma RB} + kx(s, t) \cdot X_{\sigma RC},$$

где R_{RB} , $X_{\sigma RB}$ – сопротивления частей обмотки ротора, расположенных в воздухе; R_{RC} , $X_{\sigma RC}$ – сопротивления частей обмотки ротора, расположенных в пазах при скольжении $s = s_{НОМ}$; $kr(s, t)$, $kx(s, t)$ – коэффициенты, учитывающие изменение роторных сопротивлений из-за вытеснения тока в роторе при скольжении s и в зависимости от температуры нагрева короткозамкнутого ротора.

Коэффициенты $kr(s, t)$, $kx(s, t)$ определяются рассмотрением эффекта вытеснения тока в роторе на основе теории электромагнитного поля. Коэффициенты для прямоугольного паза определяются как:

$$kr(s, t) = \zeta(s, t) \frac{\text{sh}2\zeta(s, t) + \sin 2\zeta(s, t)}{\text{ch}2\zeta(s, t) - \cos 2\zeta(s, t)}, \quad (2)$$

$$kx(s, t) = \frac{3}{2\zeta(s, t)} \frac{\text{sh}2\zeta(s, t) - \sin 2\zeta(s, t)}{\text{ch}2\zeta(s, t) - \cos 2\zeta(s, t)},$$

где $\zeta(s, t)$ – приведенная высота стержня ротора, которую, находим как:

$$\zeta(s, t) = h \cdot \sqrt{\frac{b}{a} \cdot \frac{\mu_0 \cdot \pi}{\rho(t)} \cdot f_1 \cdot s}, \quad (3)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – удельная магнитная проницаемость воздуха, Гн/м; a – ширина паза ротора, м; b – ширина паза ротора, м; h – ширина проводника, м; f_1 – частота питающей сети, Гц; ρ – удельное сопротивление проводника от температуры, Ом·м; s – скольжение.

Функциональную зависимость удельного сопротивления проводника от температуры определяем согласно (4):

$$\rho(t) = \rho_0 \cdot \frac{(1 + \alpha \cdot t)}{(1 + \alpha \cdot 75)}, \quad (4)$$

где ρ_0 – удельное сопротивление проводника при температуре 75°C , Ом·м; t – температура, $^\circ\text{C}$; α – температурный коэффициент, $1/^\circ\text{C}$. Для меди ρ_0 составляет $0,0175 \cdot 10^{-6}$ Ом·м при температуре 75°C , а коэффициент α равен $0,004$ $1/^\circ\text{C}$ соответственно.

Приближенно для медных стержней ротора приведенная высота может быть записана как:

$$\zeta(s, t) \approx 90 \cdot h \cdot \sqrt{s}. \quad (5)$$

Для крупных асинхронных машин допускается, что величина сопротивления пазовой части обмотки ротора соответствует 80, а лобовой 20% общего сопротивления ротора [3, 4]. Тогда выражения (1) будут иметь следующий вид:

$$R_R(s, t) = R_{R0} \cdot [0,2 + 0,8 \cdot kr(s, t)] \cdot \rho(t), \quad (6)$$

$$X_{\sigma R}(s, t) = X_{\sigma R0} \cdot [0,2 + 0,8 \cdot kx(s, t)],$$

где R_{R0} и $X_{\sigma R0}$ – соответственно активное и индуктивное сопротивления при $s = s_{НОМ}$.

Для одноконтурной схемы замещения полное сопротивление ротора является функциональной зависимостью от скольжения и температуры:

$$Z_R(s, t) = \frac{R_R(s, t)}{s} + jX_{\sigma R}(s, t). \quad (7)$$

Зависимости коэффициентов kr и kx от скольжения s и температуры t представлены на рис. 3, 4.

Как видно из рис. 3, 4, при увеличении температуры наблюдается ослабление эффекта вытеснения тока в роторе, а, следовательно, ухудшение пусковых характеристик АЭД.

Для двухконтурной схемы замещения явление эффекта вытеснения тока в роторе учитывается с использованием двух параллельно включенных контуров ротора.

Полное суммарное сопротивление двух контуров, являющееся функцией от скольжения и температуры, находим как:

$$Z_R(s, t) = \left[\frac{1}{R_{R1}(s, t) + jX_{\sigma R10}} + \frac{1}{R_{R2}(s, t) + jX_{\sigma R20}} \right]^{-1}, \quad (8)$$

где $R_{R1}(s, t)$, $R_{R2}(s, t)$, – функциональные зависимости активных сопротивлений контуров ротора от скольжения и температуры:

$$R_{R1}(s, t) = \frac{R_{R10}}{s} \cdot \frac{(1 + \alpha \cdot t)}{(1 + \alpha \cdot 75)},$$

$$R_{R2}(s, t) = \frac{R_{R20}}{s} \cdot \frac{(1 + \alpha \cdot t)}{(1 + \alpha \cdot 75)},$$
(9)

где R_{R10} , R_{R20} , $X_{\sigma R10}$, $X_{\sigma R20}$ – активные и индуктивные сопротивления первого и второго контуров ротора АЭД при $s = s_{НОМ}$, t – температура, $^{\circ}\text{C}$; α – температурный коэффициент, $1/^{\circ}\text{C}$.

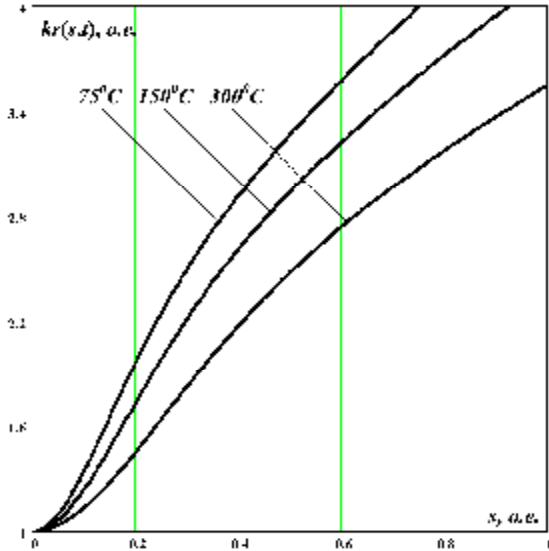


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента k_R от скольжения и температуры

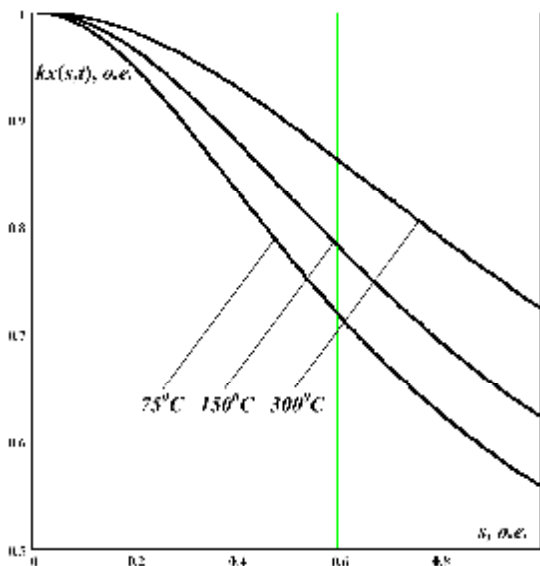


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента k_X от скольжения и температуры

На примере асинхронного электродвигателя серии АВ мощностью 630 кВт и напряжением статора 6 кВ сравним два подхода расчета пусковых и рабочих характеристик в зависимости от температуры нагрева ротора.

Параметры одноконтурной и двухконтурной схем замещения АЭД были рассчитаны по методам

[4, 5] на основе каталожных данных машины, приведенных в табл. 1.

Таблица 1 – Каталожные данные АЭД серии АВ

$P_{НОМ}$, кВт	$U_{НОМ}$, кВ	$I_{НОМ}$, А	$\cos\phi_{НОМ}$	$\eta_{НОМ}$	$M_{П}/M_{НОМ}$	$M_{МАКС}/M_{НОМ}$	$I_{П}/I_{НОМ}$	$s_{НОМ}$
630	6	92	0,87	0,92	1,5	2,5	5,5	0,01

Рассчитанные параметры одноконтурной и двухконтурной схем замещения АЭД для номинального скольжения и температуры 75°C представлены в соответственно в табл. 2, 3.

Таблица 2 – Параметры одноконтурной схемы замещения АЭД серии АВ

R_S , о.е.	$X_{\sigma S}$, о.е.	X_{μ} , о.е.	R_{R0} , о.е.	$X_{\sigma R0}$, о.е.
0,01	0,091	2,73	0,011	0,134

Таблица 3 – Параметры двухконтурной схемы замещения АЭД серии АВ

R_S , о.е.	$X_{\sigma S}$, о.е.	X_{μ} , о.е.	R_{R10} , о.е.	$X_{\sigma R10}$, о.е.	R_{R20} , о.е.	$X_{\sigma R20}$, о.е.
0,01	0,091	2,73	0,012	0,153	0,165	0,112

На рис. 5 представлены зависимости активного и индуктивного сопротивлений ротора АЭД от скольжения для температуры 75°C , рассчитанные с использованием одноконтурной и двухконтурной схем замещения.

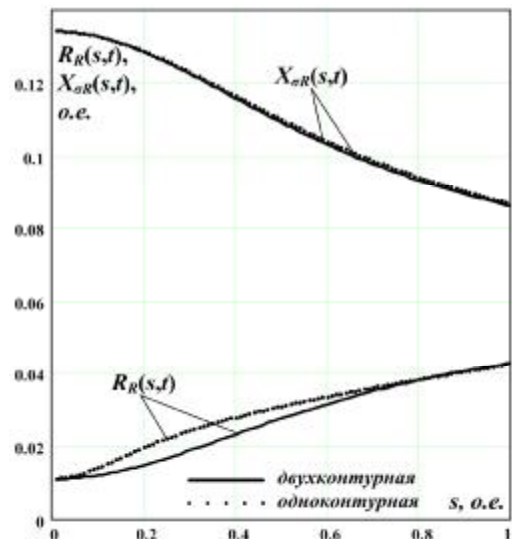


Рисунок 5 – Зависимости активного и индуктивного сопротивлений АЭД серии АВ от скольжения для температуры 75°C

Как видно из приведенных характеристик, зависимости $R_R(s,t)$ и $X_{\sigma R}(s,t)$ при рабочей температуре

75⁰С совпадають в обоих подходах, при этом, рассчитанные по этим схемам для единичного ($s = 1$), критического ($s = s_{кр}$) и номинального скольжений ($s = s_{НОМ}$) моменты и токи совпадают.

Расчетным путем было установлено, что эффект вытеснения тока зависит от температуры нагрева ротора, что подтверждается зависимостями коэффициентов $k_r(s,t)$ и $k_x(s,t)$ (рис. 3 и 4). Как видно из рис. 5, увеличение температуры приводит к ослаблению эффекта вытеснения тока в роторе, что сказывается на уменьшении активного сопротивления ротора. Однако из (2) следует, что при росте температуры активное сопротивление ротора при $s = 1$ будет возрастать пропорционально $\sqrt{\rho(t)}$, так как приведенная высота ζ уменьшается при этом в $\sqrt{\rho(t)}$ раз.

Отметим также, что при этом индуктивное сопротивление ротора будет уменьшаться.

Расчитанные для рабочей температуры (75⁰С) и предельно допустимой (300⁰С) по формулам (7) и (8) зависимости сопротивлений ротора от скольжения показаны на рис. 6.

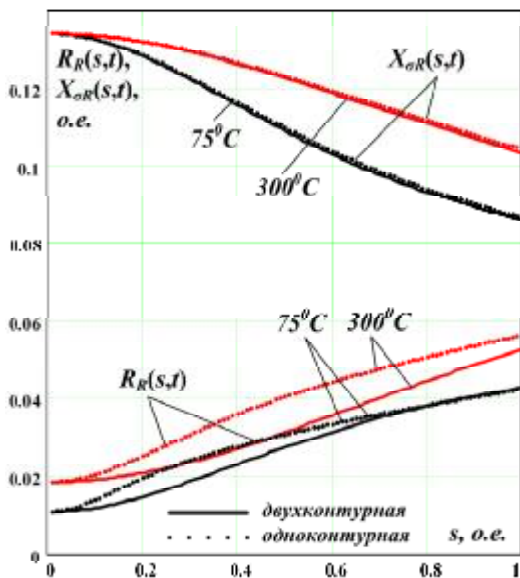


Рисунок 6 – Зависимости активного и индуктивного сопротивлений АЭД серии АВ от скольжения для температуры 75⁰С и 300⁰С

Для оценки влияния указанных отклонений сопротивлений на пусковые и рабочие характеристики АЭД были рассчитаны зависимости момента и тока статора от скольжения и температуры для одноконтурной схемы (рис. 7).

Из рис. 7 следует, что при увеличении температуры нагрева короткозамкнутого ротора момент увеличивается, а ток статора уменьшается. В области рабочей части характеристики повышение температуры приводит к увеличению скольжения.

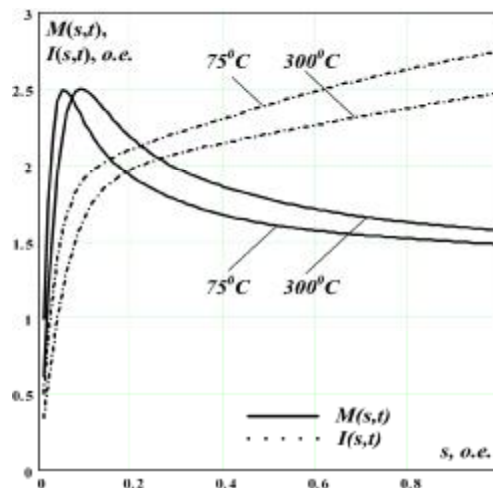


Рисунок 7 – Пусковые характеристики АЭД мощностью 630 кВт и напряжением 6 кВ

Выводы. В работе проведен анализ влияния температуры нагрева ротора на пусковые и рабочие характеристики глубокопазного асинхронного двигателя.

Установлено, что эффект вытеснения тока зависит от температуры нагрева ротора. Выявлено, что рост температуры приводит к ослаблению эффекта вытеснения тока в роторе, что влияет на уменьшение сопротивления короткозамкнутого ротора. При увеличении температуры ротора активное сопротивление ротора при $s = 1$ возрастает пропорционально не $\rho(t)$, а $\sqrt{\rho(t)}$ (это вызвано уменьшением приведенной высоты в $\sqrt{\rho(t)}$ раз). При этом индуктивное сопротивление ротора уменьшается. Повышение температуры ротора при заданном моменте сопротивления приводит к увеличению скольжения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

1. Копылов И.П. Электрические машины: Учеб. для вузов. – 5-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2006. – 607 с.
2. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока: Учебник для вузов. – СПб.: Питер, 2007. – 350 с.
3. Ойрех Я.А., Сивокобыленко В.Ф., Режимы самозапуска асинхронных двигателей. М.: Энергия, 1974. – 96 с.
4. Сивокобыленко В.Ф., Лебедев В.К. Переходные процессы в системах электроснабжения собственных нужд электростанций. Уч. пособие, Донецк, ДонНТУ, 2002. - 136 с.
5. Сивокобыленко В.Ф., Павлюков В.А. Расчет параметров схем замещения и пусковых характеристик глубокопазных асинхронных машин // Электричество, 1979, №10. – С. 35-39.

Стаття надійшла 11.04.2007 р.