

РАСЧЁТ РЕЖИМОВ ПУСКА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С УЧЁТОМ ВЫТЕСНЕНИЯ ТОКА И ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА РОТОРА

Асинхронные электродвигатели (АЭД) с глубокопазным короткозамкнутым ротором (КЗР) широко применяются в настоящее время в промышленности в качестве электропривода. Методам расчёта характеристик АЭД с учётом вытеснения тока в роторе посвящены работы [1,2]. Влияние температуры нагрева стержней ротора на вытеснение тока рассмотрено в работах [3,4]. Однако совместный учёт вытеснения тока и температуры нагрева на динамические характеристики рассмотрен в литературе в недостаточной мере.

Целью данной работы является учёт влияния на динамические пусковые характеристики глубокопазных АЭД вытеснения тока и температуры нагрева ротора.

Эквивалентную схему замещения (ЭСЗ) АЭД с КЗР (рис. 1) представим как состоящую из активного сопротивления статора, зависящего от температуры нагрева $R_S(V)$, индуктивного сопротивления рассеяния статора $X_{\sigma S}$, сопротивления взаимной индуктивности между статором и ротором X_{μ} , активного сопротивления контура потерь в стали статора, зависящего от температуры нагрева $R_{FE}(V)$, и индуктивного сопротивления рассеяния этого контура $X_{\sigma FE}$, активного и индуктивного сопротивления рассеяния ротора $R_R(s, V)$, $X_{\sigma R}(s, V)$, зависящих от частоты (скольжения) тока в роторе и температуры нагрева V [5].

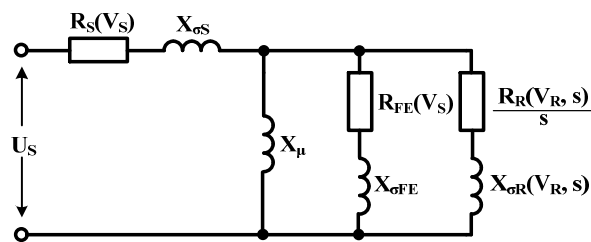


Рис.1 Эквивалентная схема замещения АЭД с КЗР.

Для крупных АЭД можно принять, что при номинальном скольжении сопротивление пазовой части составляет 80 %, а лобовой 20% от общего сопротивления обмотки ротора [2,4]. Тогда выражения для определения сопротивлений ротора с учётом эффектов вытеснения тока и температуры нагрева будут иметь вид:

$$R_R(s, V) = R_{R0} \cdot [0,2 + 0,8 \cdot kr(s, V)] \cdot \rho(V), \quad X_{\sigma R}(s, V) = X_{\sigma R0} \cdot [0,2 + 0,8 \cdot kx(s, V)], \quad (1)$$

$$kr(s, V) = \zeta(s, V) \frac{\operatorname{sh} 2\zeta(s, V) + \sin 2\zeta(s, V)}{\operatorname{ch} 2\zeta(s, V) - \cos 2\zeta(s, V)}, \quad kx(s, V) = \frac{3}{2\zeta(s, V)} \cdot \frac{\operatorname{sh} 2\zeta(s, V) - \sin 2\zeta(s, V)}{\operatorname{ch} 2\zeta(s, V) - \cos 2\zeta(s, V)},$$

$$\zeta(s, V) = h \cdot \sqrt{\frac{b}{a} \cdot \frac{\mu_0 \cdot \pi}{\rho(V)} \cdot f_1 \cdot s}, \quad \rho(V) = \rho_0 \cdot K_V, \quad K_V = (1 + \alpha \cdot V) / (1 + \alpha \cdot V_{\text{нач}}),$$

где $kr(s, V)$, $kx(s, V)$ – коэффициенты, учитывающие изменение роторных сопротивлений прямоугольного сечения из-за вытеснения тока в роторе при скольжении s и температуре нагрева V ; R_{R0} и $X_{\sigma R0}$ – соответственно активное и индуктивное сопротивления при $s \approx 0$; K_V – коэффициент коррекции активных сопротивлений обмоток АЭД от текущего значения температуры V ; α – температурный коэффициент проводника обмотки, $1/^\circ\text{C}$, $V_{\text{нач}}$ – температура холодного (начального) состояния машины, $^\circ\text{C}$; $\zeta(s, V)$ – приведенная высота стержня ротора, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – удельная магнитная проницаемость воздуха, Гн/м; a – ширина паза ротора, м; b – ширина стержня в пазу ротора, м; h – высота проводника, м; f_1 – частота питающей сети, Гц; ρ – удельное сопротивление проводника от температуры, Ом·м; ρ_0 – удельное сопротивление проводника при начальной температуре, Ом·м. 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.

Характер зависимостей коэффициентов kr и kx от скольжения s и температуры V представлен на рис. 2, из которых следует, что с ростом температуры эффект вытеснения тока ослабляется. Для анализа динамических пусковых характеристик используем математическую модель электродвигателя, представленную дифференциальными уравнениями (ДУ), записанными в неподвижной относительно статора системе координат α, β (2).

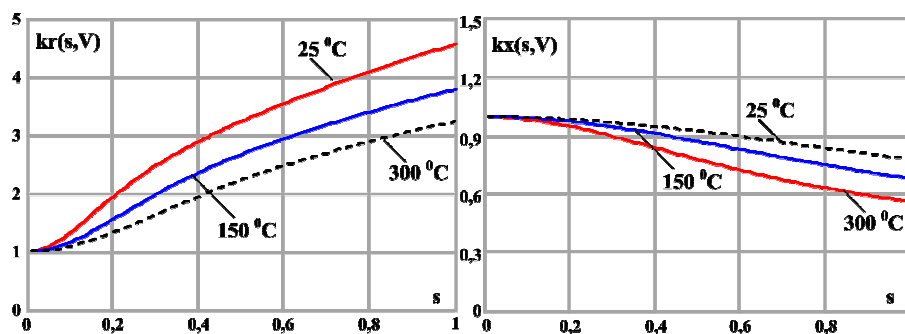


Рис. 2 Зависимость коэффициентов вытеснения тока от скольжения и температуры.

$$\begin{cases} p\Psi_{S,\alpha} = U_{S,\alpha} - R_S(V) \cdot i_{S,\alpha}, & p\Psi_{S,\beta} = U_{S,\beta} - R_S(V) \cdot i_{S,\beta}, \\ p\Psi_{R,\alpha} = -R_R(s, V) \cdot i_{R,\alpha} + \omega \cdot \Psi_{R,\beta}, & p\Psi_{R,\beta} = -R_R(s, V) \cdot i_{R,\beta} - \omega \cdot \Psi_{R,\alpha}, \\ p\Psi_{FE,\alpha} = -R_{FE}(V) \cdot i_{FE,\alpha}, & p\Psi_{FE,\beta} = -R_{FE}(V) \cdot i_{FE,\beta}, \\ p\omega = J^{-1} \cdot (m(t) - M_c(\omega, k_3)), & pV = \frac{2}{P_{HOM} \cdot J} \cdot (m(t) \cdot s - m_{HOM} \cdot s_{HOM}). \end{cases} \quad (2)$$

где $i_{S,\alpha} = \frac{\Psi_{S,\alpha} - \Psi_{\mu,\alpha}}{X_{\sigma S}}$, $i_{R,\alpha} = \frac{\Psi_{R,\alpha} - \Psi_{\mu,\alpha}}{X_{\sigma R}(s, V)}$, $i_{FE,\alpha} = \frac{\Psi_{FE,\alpha} - \Psi_{\mu,\alpha}}{X_{\sigma FE}}$, $i_{\mu,\alpha} = i_{S,\alpha} + i_{R,\alpha} + i_{FE,\alpha}$, $s = 1 - \omega$,

$i_{S,\beta} = \frac{\Psi_{S,\beta} - \Psi_{\mu,\beta}}{X_{\sigma S}}$, $i_{R,\beta} = \frac{\Psi_{R,\beta} - \Psi_{\mu,\beta}}{X_{\sigma R}(s, V)}$, $i_{FE,\beta} = \frac{\Psi_{FE,\beta} - \Psi_{\mu,\beta}}{X_{\sigma FE}}$, $i_{\mu,\beta} = i_{S,\beta} + i_{R,\beta} + i_{FE,\beta}$. $a_S = \frac{X_{SR}}{X_{\sigma S}}$, $a_R = \frac{X_{SR}}{X_{\sigma R}(s, V)}$,

$\Psi_{\mu,\alpha} = a_S \cdot \Psi_{S,\alpha} + a_R \cdot \Psi_{R,\alpha} + a_{FE} \cdot \Psi_{FE,\alpha}$, $\Psi_{\mu,\beta} = a_S \cdot \Psi_{S,\beta} + a_{R1} \cdot \Psi_{R,\beta} + a_{FE} \cdot \Psi_{FE,\beta}$, $m(t) = (\Psi_{S,\beta} \cdot \Psi_{\mu,\alpha} - \Psi_{S,\alpha} \cdot \Psi_{\mu,\beta}) / X_{\sigma S}$,

$a_{FE} = \frac{X_{SR}}{X_{\sigma FE}}$, $X_{SR} = [X_{\mu}^{-1} + X_{\sigma S}^{-1} + (X_{\sigma R}(s, V))^{-1} + X_{\sigma FE}^{-1}]^{-1}$, $\Delta P = |i_S|^2 \cdot R_S(V) + |i_R|^2 \cdot R_R(s, V) + |i_{FE}|^2 \cdot R_{FE}(V)$.

где $\Psi_{S,\alpha}, \Psi_{R,\alpha}, \Psi_{FE,\alpha}, \Psi_{S,\beta}, \Psi_{R,\beta}, \Psi_{FE,\beta}, i_{S,\alpha}, i_{R,\alpha}, i_{FE,\alpha}, i_{S,\beta}, i_{R,\beta}, i_{FE,\beta}$ – мгновенные значения потокосцеплений и токов по осям α и β статора, контура ротора и контура потерь в стали; $\Psi_{\mu,\alpha}, \Psi_{\mu,\beta}, i_{\mu,\alpha}, i_{\mu,\beta}$ – мгновенные значения рабочего потокосцепления (потокосцепление воздушного зазора) и тока намагничивания по осям α и β ; a_S, a_R, a_{FE} – коэффициенты распределения потокосцеплений статора, контура ротора и контура потерь в стали; X_{SR} – суммарная входная проводимость двигателя; ω – мгновенное значение угловой частоты вращения ротора АЭД; $m(t)$ – текущее расчетное значение электромагнитного момента на валу; M_c, J, k_3 – момент сопротивления, суммарный момент инерции привода и коэффициент загрузки механизма; $U_{S,\alpha}, U_{S,\beta}$ – мгновенные значения напряжения статора по осям α и β ; ΔP – потери мощности в асинхронной машине.

В качестве примера был промоделирован режим двух пусков, следующих подряд, для АЭД с КЗР типа ДАЗО-450Х-6У1 ($P_{HOM} = 500$ кВт; $U_{HOM} = 6$ кВ; $I_{HOM} = 60$ А; $\eta_{HOM} = 0,944$ о.е.; $s_{HOM} = 0,015$ о.е.; $\cos\phi_{HOM} = 0,85$; $M_{II}/M_{HOM} = 1,2$ о.е.; $M_{МАКС}/M_{HOM} = 2,5$ о.е.; $I_{II}/I_{HOM} = 5$ о.е.). Параметры ЭСЗ для начальной температуры 25°C ($R_S = 0,016$ о.е.; $X_{\sigma S} = 0,1$ о.е.; $X_{\mu} = 2,89$ о.е.; $R_{FE} = 10,656$ о.е.; $X_{\sigma FE} = 24,799$ о.е.; $R_{R0} = 0,042$ о.е.; $X_{\sigma R0} = 0,042$ о.е.), рассчитанные по методике [5]. Зависимости тока статора, температуры нагрева, угловой частоты вращения ротора и потерь мощности от времени показана на рис.3., из которого следует, что продолжительность пуска АЭД из горячего состояния меньше, чем из холодного. Однако скольжение и потери в установившемся режиме превосходят таковые для менее нагретой машины.

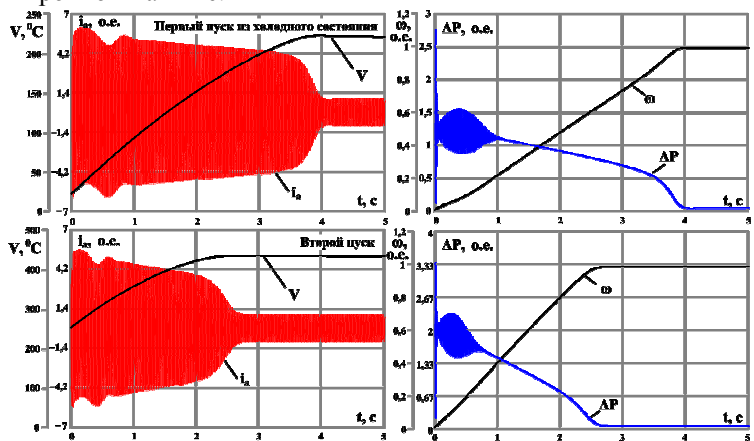


Рис. 3 - Зависимости тока статора (фаза А), температуры нагрева, угловой частоты вращения ротора и потерь мощности от времени.

Вывод. Предложен метод расчёта динамических пусковых характеристик асинхронного электропривода с учётом влияния эффекта вытеснения и температуры нагрева.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / Под ред. Л.Г. Мамиконяца. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
2. Ойрех Я.А. Режимы самозапуска асинхронных двигателей / Я.А. Ойрех, В.Ф. Сивокобыленко – М.: Энергия, 1974. – 96 с.
3. Богуславский И.З. Метод расчёта поверхностного эффекта в стержне клетки ротора с учётом изменения в нём температуры при пуске / И.З. Богуславский, М.В. Кришьянис // Научно-технический журнал «Электротехника». – 2008. – № 3. – С. 24 – 31.
4. Сивокобыленко В.Ф. Влияние температуры нагрева ротора на рабочие и пусковые характеристики глубоководного асинхронного двигателя / В.Ф. Сивокобыленко, С.Н. Ткаченко // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені М. Остроградського. – Вип. 3(44). – частина 2. – Кременчук, 2007. – С. 8 – 11.
5. Сивокобыленко В.Ф. Математическое моделирование характеристик асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором с учётом потерь в стали / В.Ф. Сивокобыленко, С.Н. Ткаченко // Збірник наукових праць ДВНЗ «Донецький національний технічний університет». Серія «Електротехніка і енергетика». – випуск 7 (128). – Донецьк, 2007. – С. 126 – 131.