

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В АСИНХРОННОМ ТЯГОВОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ТРОЛЛЕЙБУСОВ

Егоров Е.А.

Научный руководитель – д-р. техн. наук Пантелеев В.И.

*Сибирского федерального университета*

Эксплуатация ПС в городских условиях предполагает преимущественно работу в повторно-кратковременных режимах. Для асинхронных приводов весьма важным является определение допустимой частоты включений, которая в значительной степени определяется потерями энергии в двигателе в переходных режимах.

Электромагнитные процессы в АД описываются системой дифференциальных уравнений, которые выведены в предположении отсутствия потерь в стали машины.

Электрические потери в обмотках статора могут быть вычислены по уравнению

$$P_{2s} = (i_{\alpha s}^2 + i_{\beta s}^2) \cdot r_s, \quad (1)$$

а электрические потери в роторе

$$P_{2r} = (i_{\alpha r}^2 + i_{\beta r}^2) \cdot r_r, \quad (2)$$

где  $i_{\alpha}, i_{\beta}, i_{\alpha'}, i_{\beta}'$  - составляющие токов статора и ротора в осях координат  $\alpha, \beta$ ;  $r_s, r_r$  - активные сопротивления обмоток статора и ротора.

Однако с точки зрения специфики частотного управления удобнее вычислять потери в роторе как произведение электромагнитного переходного момента частоты абсолютного скольжения  $\Delta \omega = \omega_k - \omega$

$$P_{2r} = M \cdot \Delta \omega, \quad (3)$$

Энергия электрических потерь за все время переходного процесса может быть вычислена как

$$\theta = \int (P_{2s} + P_{2r}) dt, \quad (4)$$

Активная мощность, потребляемая двигателем, от источника питания

$$P_1 = P_{2s} + P_{2r} + M \cdot \omega, \quad (5)$$

где  $M \cdot \omega = P_2$  - полезная мощность, развиваемая двигателем.

Моделирование потерь осуществляется для троллейбуса с двигателем АТЧД – 250 мощностью 150 кВт по схеме, основанной на передаточных функциях, характеризующих динамические процессы в асинхронном электродвигателе при векторном управлении при общепринятых допущениях, рис. 1.

Схема содержит два одинаковых по параметрам внутренних контура регулирования составляющих  $I_{1\alpha}, I_{1\beta}$  тока статора с коэффициентом обратной связи по току  $k_{om}$ , внешний контур регулирования потокосцепления ротора с коэффициентом обратной связи по потокосцеплению  $k_{on}$  и внешний контур регулирования скорости двигателя с коэффициентом обратной связи по скорости  $k_{os}$ .

Приведённая схема подобна структурной схеме системы двухзонного регулирования скорости двигателя постоянного тока.

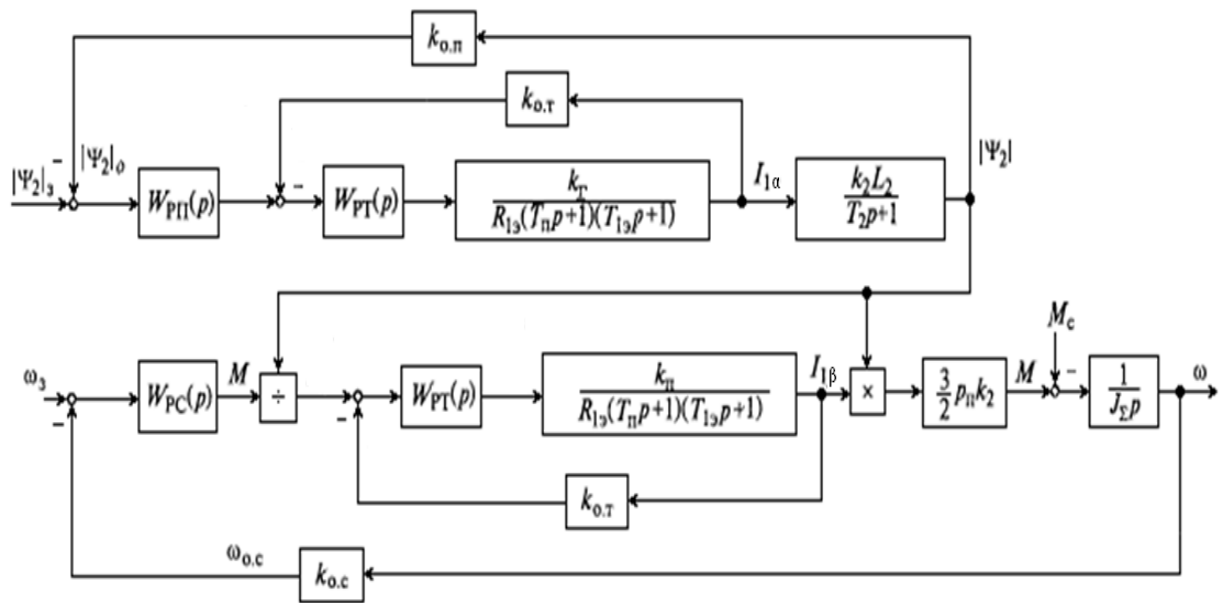


Рис. 1. Структурная схема системы электропривода при векторном управлении

Поэтому при настройке контуров регулирования на модульный оптимум определение параметров передаточных функций регуляторов тока  $W_{PI}(p)$ , потокосцепления  $W_{PI}(p)$  и скорости  $W_{PI}(p)$  выполняется аналогично:

$$\begin{aligned}
 W_{PI}(p) &= k_{pm} + \frac{1}{T_{uI} p}; \\
 W_{PI}(p) &= k_{pn} + \frac{1}{T_{uN} p}; \\
 W_{PI}(p) &= k_{pc},
 \end{aligned} \tag{6}$$

где  $k_{pm}$  - передаточный коэффициент пропорциональной части регулятора тока:

$$k_{pm} = T_{13} / T_{uI}; \tag{7}$$

$T_{uI}$  - постоянная времени интегрирования ПИ-регулятора тока:

$$T_{uI} = \frac{k_{em} k_n}{s_{13}} \alpha_I T_n; \tag{8}$$

$k_{pn}$  - передаточный коэффициент пропорциональной части регулятора потокосцепления ротора:

$$k_{pn} = T_2 / T_{uN}; \tag{9}$$

$T_{uN}$  - постоянная времени интегрирования ПИ-регулятора потокосцепления ротора:

$$T_{uN} = \frac{k_{em} L_{12}}{k_{em}} \alpha_n \alpha_I T_n; \tag{10}$$

$k_{pc}$  - передаточный коэффициент П - регулятора скорости:

$$k_{pc} = \frac{2f k_{em}}{3 p_n k_2 k_{sc} \alpha_\omega \alpha_I T_n}. \tag{11}$$

В приведенных формулах значения  $\alpha_I$ ,  $\alpha_n$  и  $\alpha_\omega$  находятся в диапазоне от 2 до 4.

Для перехода от модели двигателя к модели троллейбуса необходимо учесть инерцию поступательного движения ПС и привести ее к инерции вращающихся масс по формуле, кг\*м<sup>2</sup>:

$$J = J_p + m_{TP} \frac{D_K^2}{4 \cdot \mu^2} \quad (12)$$

где  $J_p$  - момент инерции ротора, кг\*м<sup>2</sup>,  $m_{TP}$  - масса троллейбуса, кг,  $D_K$  - диаметр колеса, м,  $\mu$  - передаточное число редуктора.

Также необходимо преобразовать измеряемые параметры двигателя в соответствующие параметры троллейбуса, т.е. в силу тяги  $F = f(t)$  и линейную скорость  $V = f(t)$  по известным формулам:

$$F = \xi \frac{2\mu}{D_K} \cdot M \quad (13)$$

где  $\xi$  - КПД зубчатой передачи,

$$V = 1,8 \frac{D_K}{\mu} \cdot \omega \quad (14)$$

где  $\omega$  - частота вращения колеса, рад/с.

Основное удельное сопротивление движению троллейбуса определяется по эмпирической зависимости, Н/кН:

$$W_0 = a + bV^2 \quad (15)$$

где  $a=12$  и  $b=0,004$  – коэффициенты.

Далее необходимо привести основное удельное сопротивление движения к моменту сопротивления двигателя, Н\*м:

$$M_c = W_0 \cdot m_{TP} \frac{D_K}{\mu} \quad (16)$$

где  $m_{TP}$  - масса троллейбуса, кН.

В результате моделирования, согласно формулам (1), (3), (4) и (5), были получены зависимости энергетических потерь от времени, рис.2.

Представленная модель позволяет исследовать потери, как при пуске, так и при реверсе.

Моделирование потерь по данной методике может осуществляться также и для вагонов трамвая с асинхронным приводом при различных режимах пуска, что может послужить теоретической основой для исследования и оптимизации систем управления ЭПС по потребляемой энергии.

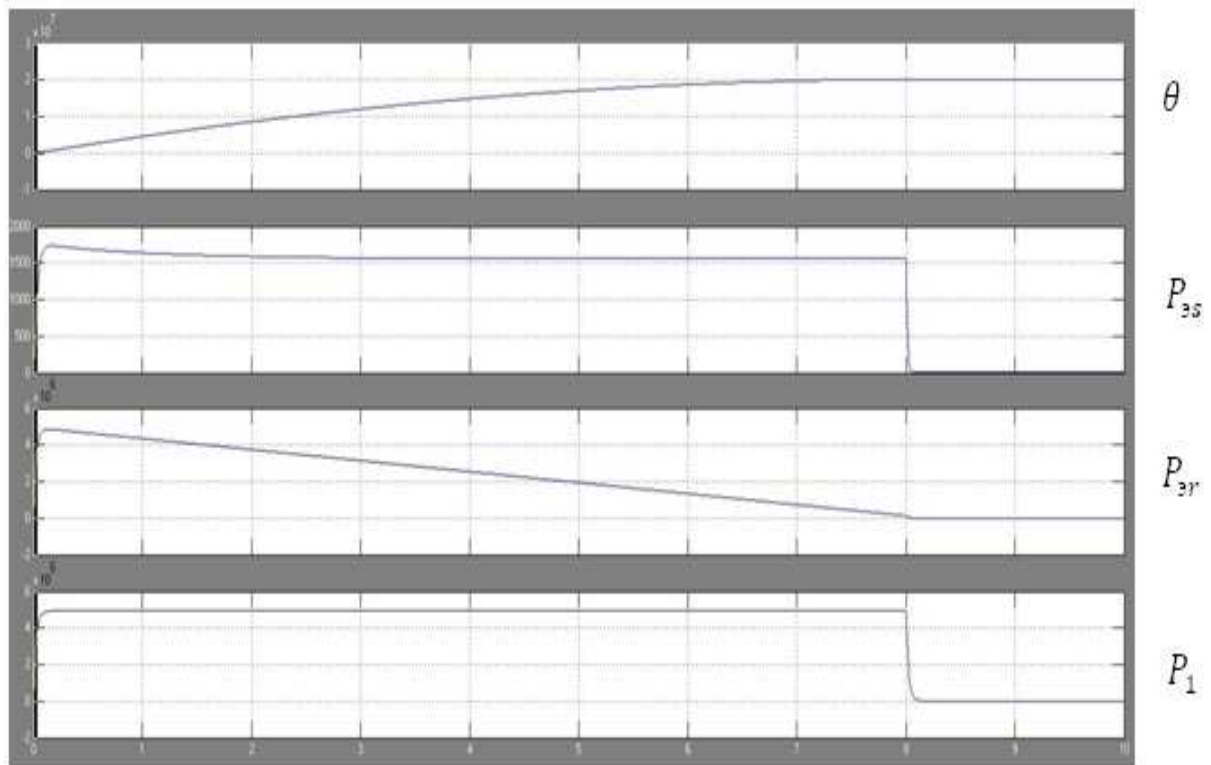


Рис. 2. Потери при движении троллейбуса на горизонтальном участке без учета массы пассажиров  $\theta(t), P_{3s}(t), P_{3r}(t), P_1(t)$