

МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ В ЭЛЕКТРОМОБИЛЕ

Нго Фыонг Ле, Гульков Г.И.

Белорусский национальный технический университет

Одной из особенностей электромобиля является возможность рекуперативного торможения. На рис. 1а приведена схема электропривода с синхронным двигателем с постоянными магнитами, которая может использоваться для рекуперативного торможения.

При низкой скорости электродвижущая сила (ЭДС) меньше напряжения аккумулятора и аккумулятор не заряжается. В этом случае схема должна работать в качестве повышающего преобразователя путем переключения нижних ключей (Т2, Т4, Т6). Если ключи Т2, Т4, Т6 открыты, электроэнергия накапливается в обмотках. Если ключи Т2, Т4, Т6 закрыты, энергия протекает через диоды D1, D3, D5 и заряжает аккумулятор.

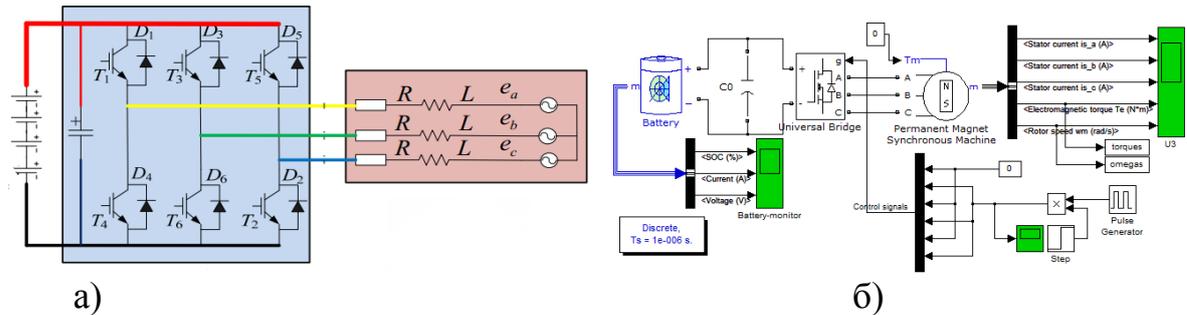


Рис 1. а) Схема электропривода СДПМ б) Схема имитационной модели электропривода СДПМ в режиме рекуперативного торможения

Уравнение электрической цепи и выражение момента СДПМ:

$$\begin{aligned}
 u_d &= Ri_d - \omega L_q i_q \\
 u_q &= Ri_q + \omega L_d i_d + \omega \psi_M \\
 M &= \frac{3}{2} p (\psi_M i_q + (L_d - L_q) i_d i_q)
 \end{aligned} \tag{1}$$

где i_d, i_q – составляющие вектора тока якоря в осях d, q, соответственно; u_d, u_q – составляющие вектора напряжения якоря в осях d, q, соответственно; ψ_M – потокосцепление от постоянных магнитов; R – активное сопротивление обмотки якоря; L_d, L_q – составляющие индуктивности якоря в осях d, q, соответственно; p – число пар полюсов; M – электромагнитный момент; ω – электрическая угловая скорость ротора.

При рекуперативном торможении амплитуда вектора напряжения и отношение между составляющими векторов напряжения и тока:

$$u_d^2 + u_q^2 = \left(\frac{2}{\pi} U_B \right)^2 (1 - \gamma)^2 \quad u_d i_q - u_q i_d = 0 \tag{2}$$

где U_B – напряжение аккумулятора; γ – скважность.

Подставив (2) в (1) и решив систему уравнений, получим выражения составляющих вектора тока СДПМ при рекуперативном торможении, которые зависят от скорости ω и скважности γ :

$$i_d = i_d(\omega, \gamma) = \frac{1}{2} \frac{(L_d - 2L_q)\psi_M}{L_d(L_d - L_q)} - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L_q^2 \psi_M^2}{L_d^2(L_q - L_d)^2} - \frac{16U_B^2}{\pi^2 L_d(L_q - L_d)} \frac{(1-\gamma)^2}{\omega^2}} \quad (3)$$

$$i_q = i_q(\omega, \gamma) = -\sqrt{-\frac{i_d(\omega, \gamma)}{L_q}(\psi_M + L_d i_d(\omega, \gamma))}$$

Подставив выражения составляющих вектора тока $i_d(\omega, \gamma)$ и $i_q(\omega, \gamma)$ (3) в выражение момента (1), получим механическую характеристику $M(\omega, \gamma)$. На рис. 2а представлена механическая характеристика СДПМ при разных значениях скважности $\gamma=0,1-0,9$.

Осуществлено имитационное моделирование системы электропривода СДПМ в режиме рекуперативного торможения. На рис 2б,в,г представлены результаты имитационного моделирования в сравнении с аналитическим расчетом, отклонение между которыми не превышает 14%.

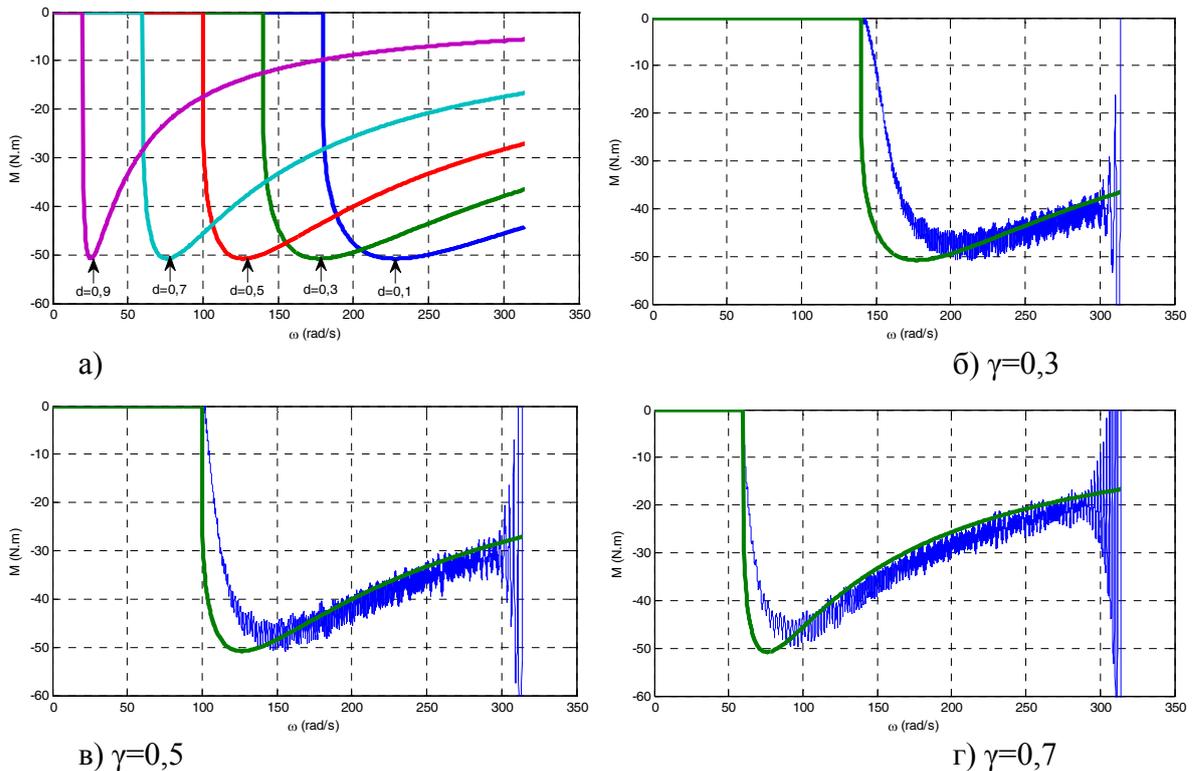


Рис 2. Механические характеристики СДПМ при рекуперативном торможении: а) результаты аналитического расчета при разных значениях скважности $\gamma=0,1-0,9$; б)в)г) сранение между имитационным моделированием и аналитическим расчетом при $\gamma=0,3;0,5;0,7$