

## АНАЛИЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ СКОРОСТИ ВВЕРХ ОТ НОМИНАЛЬНОЙ

За последние десятилетия прогресс в области цифровой вычислительной техники, силовой электроники и появление новых магнитных материалов привели к значительному скачку в развитии синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ, англ. PMSM – permanent magnet synchronous motor). Данный тип электрических машин обладает преимуществами по сравнению с асинхронными двигателями (АД) и двигателями постоянного тока (ДПТ) и постепенно вытесняет последние из многих отраслей промышленности и непромышленной сферы. Это относится, прежде всего, к системам управления скоростью и положением с однозонным регулированием. В то же время существуют механизмы, у которых с повышением скорости уменьшается потребность в электромагнитном моменте (главные приводы прокатных станков и станков, компрессоры, моталки и т.п.). Для таких механизмов целесообразно регулирование скорости выше номинальной за счет ослабления магнитного поля. В ДПТ это достигается за счет уменьшения потока возбуждения, в АД – за счет уменьшения потокосцепления ротора, а в СДПМ – за счет увеличения отрицательного значения продольной составляющей тока статора, которая создает поле статора, противодействующее потоку постоянных магнитов. В то время как системы регулирования скорости АД и ДПТ с ослаблением поля изучены достаточно хорошо, аналогичные системы для СДПМ имеют свои особенности [1], и нуждаются в дополнительных исследованиях.

Целью данной работы является исследование системы регулирования скорости СДПМ в диапазоне выше номинальной.

Для управления СДПМ чаще всего используют полеориентированную систему векторного управления, которая синтезируется на основании модели двигателя во вращающейся двухфазной ортогональной системе координат  $dq$  с ориентацией действительной оси по вектору потока ротора.

В зависимости от расположения магнитов на роторе СДПМ можно разделить на несколько видов, среди которых на данный момент наибольшее распространение получили SPMSM (Surface PMSM), в которых магниты расположены на поверхности ротора. Поскольку магнитная проницаемость материала, из которого изготовлены постоянные магниты, близка к проницаемости воздуха [2], то при таком способе установки магнитов продольная и поперечная составляющие индуктивности являются практически одинаковыми, что позволяет сделать допущение:  $L_d = L_q = L$ . Математическое описание СДПМ с поверхностными магнитами в системе  $dq$  при принятом допущении имеет вид:

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L \frac{di_d}{dt} - z_p \omega \psi_q, \\ u_q = Ri_q + L \frac{di_q}{dt} + z_p \omega \psi_d, \\ T_e = \frac{3}{2} z_p \psi_{pm} i_q, \\ J \frac{d\omega}{dt} = T_e - T_l, \end{cases} \quad (1)$$

где

$$\psi_d = i_d L + \psi_{pm}, \quad \psi_q = i_q L \quad (2)$$

– магнитные потоки статора по каналам  $d$  и  $q$  соответственно;  $u_d, u_q, i_d, i_q$  – проекции пространственных векторов напряжения и тока статора на оси  $d$  и  $q$ ;  $R$  – активное сопротивление фазы статора;  $z_p$  – число пар полюсов;  $\omega$  – угловая частота ротора;  $\psi_{pm}$  – магнитный поток, создаваемый постоянными магнитами;  $T_e, T_l$  – электромагнитный момент двигателя и момент статического сопротивления;  $J$  – момент инерции.

При питании статора двигателя от преобразователя частоты необходимо учитывать следующие ограничения:

$$\begin{cases} I_s = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \leq I_{\max}, \\ U_s = \sqrt{u_d^2 + u_q^2} \leq U_{\max}, \end{cases} \quad (3)$$

где  $I_{\max}$  – максимально допустимое значение тока двигателя или преобразователя;  $U_{\max}$  – максимально возможное выходное напряжение инвертора.

Просуммируем квадраты ортогональных составляющих напряжений статора, пренебрегая падением напряжения на активном и индуктивном сопротивлениях статора:

$$U_s^2 = [z_p \omega i_q L]^2 + [z_p \omega (i_d L + \psi_{pm})]^2. \quad (4)$$

Из уравнения (4) находим:

$$\omega = \frac{U_s}{z_p \sqrt{(i_q L)^2 + (i_d L + \psi_{pm})^2}}. \quad (5)$$

Формула (5) показывает, что регулирование скорости СДПМ возможно за счет изменения  $U_s$  (первая зона) и за счет псевдоослабления поля постоянных магнитов (вторая зона). При нулевом значении  $d$ -составляющей суммарного потока (третья зона) скорость холостого хода можно увеличить теоретически до бесконечности.

Рассмотрим рекомендуемые стратегии управления в указанных зонах при отсутствии ограничения на ускорение.

Регулирование скорости в первой зоне целесообразно выполнять при  $i_d = 0$  и  $i_q = I_{\max}$ . Такая стратегия управления, в случае пренебрежения потерями в стали, обеспечивает максимальный момент при заданном токе либо минимальный ток при заданном моменте и называется «максимальный момент на ампер» (МТРА – maximum torque per ampere). При этом минимизируются потери в меди и потери на ключах инвертора [1].

После достижения скоростью номинального значения  $\omega_n$  или напряжением статора уровня  $U_m = U_{\max} - I_{\max} R$  начинается регулирование скорости во второй зоне, для которой характерно постоянство мощности, вследствие чего с ростом скорости снижается электромагнитный момент. Увеличение скорости осуществляется посредством увеличения составляющей тока  $i_d$  в отрицательном направлении. Максимально возможный диапазон изменения  $\psi_d$  при этом определяется выражением

$$\psi_{pm} \geq \psi_d = \psi_{pm} + i_d L \geq 0. \quad (6)$$

Возможность достижения нижней границы диапазона (6) зависит от величины максимально допустимого тока двигателя. При  $I_{\max} < \psi_{pm}/L$  эта граница не достижима и регулирование скорости возможно только в первой и второй зонах.

Регулирование скорости во второй зоне стремятся выполнять в режиме одновременного ограничения тока статора и напряжения инвертора. Это обеспечивается при вычислении задания на  $i_d$ -составляющую тока статора из уравнения (5) при  $U_s = E_0 = z_p \omega_n \psi_{pm}$  по сигналу задания на ток  $i_q$ , формируемому регулятором скорости, и модулю выходного сигнала датчика скорости, ограниченному снизу на уровне, соответствующем границе первой зоны. Ограничение задания на эту составляющую тока статора рассчитывается решением уравнения (5) относительно  $i_d$  при  $U_s = U_m$  и  $i_q = \sqrt{I_{\max}^2 - i_d^2}$ :

$$i_{d \text{ lim,2}} = \frac{\left(\frac{U_m}{z_p \omega}\right)^2 - \psi_{pm}^2 - (L I_{\max})^2}{2 \psi_{pm} L}. \quad (7)$$

Если  $I_{\max} > \psi_{pm}/L$ , то после достижения потоком  $\psi_d$  нулевого значения, которому соответствует

$$i_d = i_{d \text{ lim,3}} = -\psi_{pm}/L, \quad (8)$$

скорость двигатель может увеличиваться, переходя в третью зону. В этом диапазоне наиболее часто применяется стратегия «максимальный момент на вольт» (МТРВ – maximum torque per volt), соответствующая фиксированному значению  $i_d$  на уровне (8). Такой закон управления позволяет минимизировать потери в стали, которые в данном диапазоне регулирования скорости могут превышать потери в меди. Особенностью работы в третьей зоне является то, что с увеличением скорости и уменьшением электромагнитного момента и тока  $i_q$  при  $i_d = \text{const}$  суммарный ток статора также уменьшается. Вследствие этого изменение скорости в третьей зоне происходит при максимальном напряжении и при уменьшающейся амплитуде пространственного вектора тока статора.

Возможность регулирования скорости в трех зонах можно пояснить с помощью круговых диаграмм в осях  $i_d - i_q$ , представленных на рис. 1. Окружность максимального тока построена по уравнению (3), а окружности равных скоростей получены на основании выражения (4) при постоянном значении  $U_s = U_m$ .

Отрезок ОВ соответствует работе двигателя в первой зоне при использовании стратегии МТРА ( $i_d = 0, 0 \leq U_s \leq U_{\max}$ ), участок ВС – разгону двигателя во второй зоне с максимальным током и максимальным

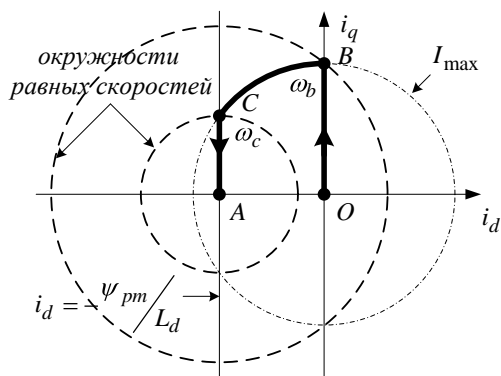


Рис. 1 Токвые траектории при трехзонном регулировании скорости

напряжением, а участок СА – работе в третьей зоне при выполнении условия (8), соответствующего стратегии МТРВ.

Из рис. 1 видно, что работа в третьей зоне возможна только в том случае, когда точка А лежит внутри окружности максимального тока.

На рис. 2 приведены переходные процессы при двух- и трехзонном регулировании. Разгон двигателя осуществляется на холостом ходу. Для математического моделирования использовался двигатель производства *Schneider Electric – BSH 1001P*, имеющий следующие параметры:  $U_n=230\text{ В}$ ;  $N_n=2500\text{ об/мин}$ ;  $T_n=2,8\text{ Нм}$ ;  $I_n=3,2\text{ А}$ ;  $I_{max}=12\text{ А}$ ;  $z_p=4$ ;  $J=1,4\cdot 10^{-4}\text{ кгм}^2$ ;  $K_t=0,89\text{ Нм/А}$ ;  $K_e=60\text{ В/кмин}^{-1}$ ;  $R=3,8\text{ Ом}$ ;  $L=17,6\text{ мГн}$ .

На рис. 2 линия  $U_{max}$  соответствует максимально возможному выходному напряжению инвертора. Уровень токоограничения был принят  $1,7I_n$ , а уровень ограничения по напряжению как  $0,8U_m$  для исключения выхода напряжения

статора за  $U_{max}$  в динамических режимах.

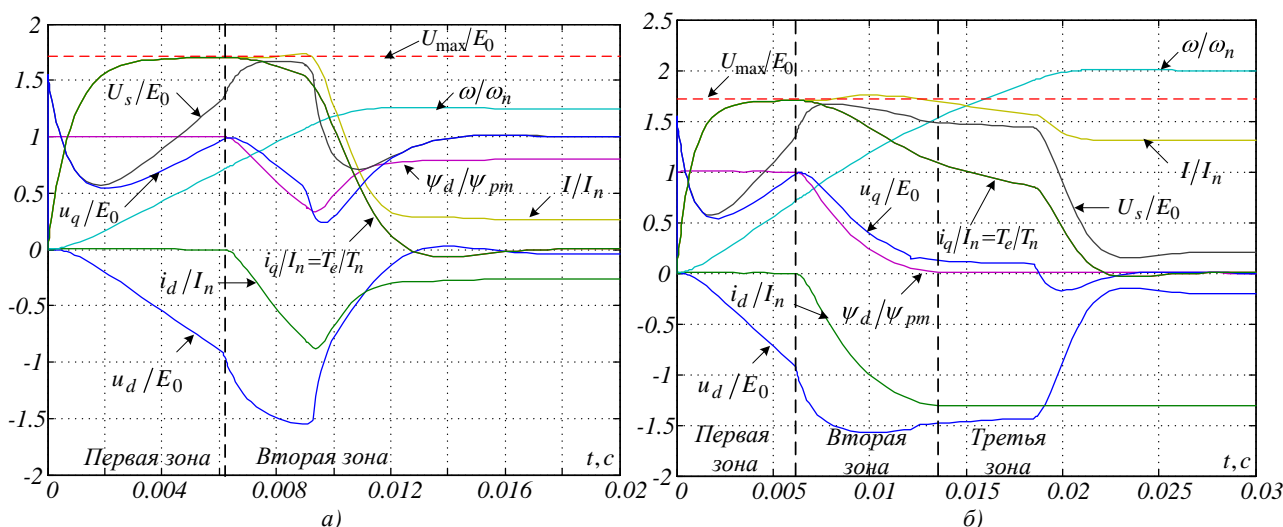


Рис.2 Переходные процессы разгона двигателя при двух- (а) и трехзонном (б) регулировании

Работе в двух зонах соответствует рис. 2, а. Особенностью работы во второй зоне является то, что в динамике может наблюдаться более значительное ослабление поля, чем в установившемся режиме холостого хода. В статике диапазон регулирования скорости обратно пропорционален диапазону ослабления поля. Следует отметить, что при расчете задания на  $d$ -составляющую тока статора, исходя из уравнения (4), поле начинает ослабляться несколько раньше, чем напряжение достигает уровня ограничения, что объясняется допущениями, принятыми при выводе указанного уравнения.

Разница в стратегиях управления скоростью во второй и третьей зонах хорошо видна в установившемся режиме. Для третьей зоны (рис. 2, б) характерным является то, что в режиме холостого хода не только  $i_q$ , но и  $u_q$  становится равным нулю, а установившееся значение амплитуды напряжения статора определяется достаточно малой величиной падения напряжения на активном сопротивлении от тока  $i_d$  ( $U_{s,\infty}=U_d=i_{d\lim}R$ ), обеспечивая выполнение стратегии «максимальный момент на вольт». Во второй зоне в этом режиме двигатель потребляет гораздо большее напряжение ( $U_{s,\infty}=E_0+i_{d,\infty}R\approx E_0$ ), но меньший ток  $I_s=i_{d,\infty}<i_{d\lim}$ .

Недостатком описанных стратегий управления скоростью СДПМ является минимизация или потерь в меди (первая зона) или потерь в стали (третья зона). Между тем в некотором диапазоне регулирования скорости более перспективным является закон управления, минимизирующий суммарные потери. Кроме этого, направлением дальнейших исследований может быть синтез и анализ системы управления СДПМ с магнитами, установленными в роторе (Interior PMSM), особенностью которого является наличие электромагнитной асимметрии ( $L_d < L_q$ ).

### Литература

1. Dierk Schröder. Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen / Dierk Schröder. – Berlin; Heidelberg : Springer, 2009. – 1336 p.
2. В.М. Перельмутер. Прямое управление моментом и током двигателей переменного тока. / Перельмутер В.М. – X.: Основа, 2004 – 210 с.