

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 непродвинутой 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 потокоцепления 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:

$$\begin{cases} u_d = R i_d + L \frac{di_d}{dt} - z_p \omega \Psi_q, \\ u_q = R i_q + L \frac{di_q}{dt} + z_p \omega \Psi_d, \\ T_e = \frac{3}{2} z_p \Psi_{pm} i_q, \\ J \frac{d\omega}{dt} = T_e - T_l, \end{cases} \quad (1)$$

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; ω – угловая частота ротора; Ψ_{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 ω_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 ψ_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 $i_q = \sqrt{I_{\max}^2 - i_d^2}$:

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

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

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

скорость двигателя 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 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: $U_n=230$ В; $N_n=2500$ об/мин; $T_n=2,8$ Нм; $I_n=3,2$ А; $I_{max}=12$ А; $z_p=4$; $J=1,4e-4$ кгм²; $K_r=0,89$ Нм/А; $K_e=60$ В/кмин⁻¹; $R=3,8$ Ом; $L=17,6$ 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.

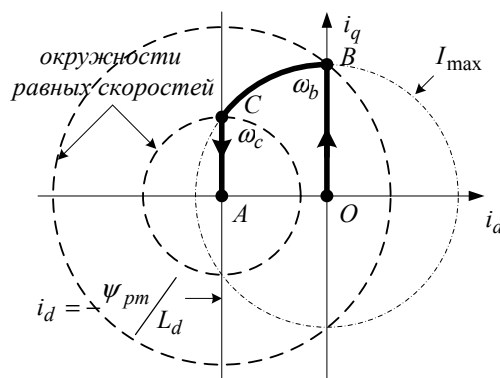


Рис. 1 Токые траектории при трехзонном регулировании скорости

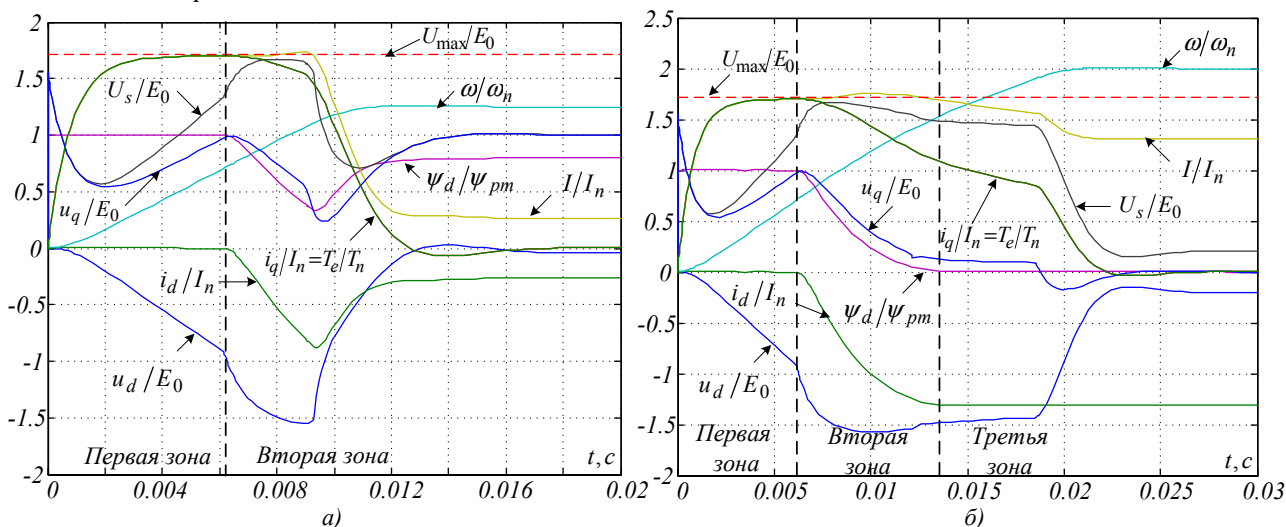


Рис.2 Переходные процессы разгона двигателя при двух- (а) и трехзонном (б) регулировании

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 ($U_{s,\infty} = U_d = i_{d\lim,3}R$), 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 $I_s = i_{d,\infty} < i_{d\lim,3}$.

Недостатком описанных стратегий управления скоростью СДПМ является минимизация или потеря в меди (первая зона) или потеря 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.