

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА ОГРАНИЧЕНИЯ МОМЕНТА БЕСКОНТАКТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ БЕЗ ДАТЧИКОВ ТОКА

К.П. Акинин, канд. техн. наук
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина
e-mail: ak.k.p@yandex.ua

Исследован способ ограничения момента бесконтактных двигателей с постоянными магнитами без использования датчиков тока. Предложен алгоритм ограничения момента двигателя. Рассмотрены основные режимы ограничения момента при пуске двигателя, скачкообразном изменении момента нагрузки и мгновенной остановке двигателя при трех значениях количества импульсов датчика частоты вращения. Приведены графики переходных процессов тока статора и частоты вращения двигателя. Библ. 2, рис. 3.

Ключевые слова: электромеханическая система, электропривод, бесконтактный двигатель с постоянными магнитами, ограничение момента двигателя.

Введение. При создании регулируемых электромеханических систем (ЭМС) (электроприводов), построенных на основе двигателей различных конструкций, широко используется подход, при котором разработчики отказываются от использования датчиков тока. Это обусловлено стремлением к упрощению и удешевлению аппаратной части схемы электропривода при условии выполнения требований технического задания.

В настоящее время имеется большое количество работ по вопросам разработки и исследований систем автоматического регулирования (САР) с наблюдателями состояния.

В работе [2] описан общетеоретический подход к управлению механическими координатами электродвигателей без измерения токов. Здесь же приведен обзор значимых публикаций по рассматриваемому вопросу.

Необходимо обратить внимание на возможность построения ЭМС малой мощности на основе БДПМ без использования датчиков тока. В этом случае для простых встроенных приложений возможна и допустима реализация одноконтурной САР частоты вращения или углового положения ротора, при этом для обеспечения безопасной работы двигателя и механизма осуществляется ограничение момента в режимах пуска, перегрузки и стопорения двигателя без контроля тока. Также должно учитываться реальное качество сигнала обратной связи по частоте вращения.

Цель статьи – разработка алгоритма и исследование режима ограничения момента БДПМ на заданном уровне без использования датчиков тока с учетом свойств импульсного датчика частоты вращения, где БДПМ является исполнительным элементом САР частоты вращения.

Основное изложение. В качестве основы для построения исследуемой ЭМС используется БДПМ с беспазовой конструкцией статора при поверхностной установке постоянных магнитов на роторе. Для таких двигателей характерны относительно малые значения электромагнитных постоянных времени статорных обмоток и равенство индуктивностей $L_d = L_q = L$. Первое обстоятельство позволяет при разработке алгоритма ограничения момента отказаться от учета влияния индуктивности статорных обмоток. Второе – определяет зависимость момента БДПМ от величины квадратурной компоненты статорного тока i_q . В ЭМС на основе БДПМ процессы регулирования частоты вращения и ориентации системы статорных токов по полю ротора происходят независимо один от другого. Поэтому в данной статье второй процесс не будет рассматриваться, полагая равенство нулю прямой компоненты статорного тока i_d .

Для исследования рассматриваемых САР воспользуемся математической моделью БДПМ при $i_d = 0$:

$$di_q/dt = (u_q - e - Ri_q)/L; \quad d\omega/dt = (M - M_C)/J; \quad d\alpha/dt = \omega, \quad (1)$$

где $e = k_m \cdot \omega$, i_q – ЭДС и ток статора двигателя; u_q – напряжение питания; k_m – коэффициент момента двигателя; R , L – активное сопротивление и индуктивность обмотки статора; J – момент инерции, приведенный к валу двигателя; $M = k_m \cdot i_q$, M_C – момент вращения двигателя и момент сопротивления механизма; ω , α – частота вращения и угол поворота вала двигателя.

Пренебрегая влиянием индуктивности статорных обмоток L на основании первого уравнения модели (1), определим напряжение, при котором величина тока не превысит заданное значение тока I_3 :

$$U_3 = (R_3 \cdot I_3 + k_{m3} \cdot \omega_1), \quad (2)$$

где $R_3 = (1 + a_T(T - T_0)R_0)$; $k_{m3} = (1 - b_T(T - T_0))k_{m0}$ – параметры двигателя, соответствующие реальным R и k_m , определяемые с учетом изменяющейся температуры двигателя; ω_1 – сигнал, соответствующий частоте вращения; T_0 , R_0 , k_{m0} – заданные исходные температура, активное сопротивление и коэффициент момента двигателя; T – температура двигателя; a_T – температурный коэффициент проводника обмотки (для меди $a_T = 0,0039$ $1/C^\circ$); b_T – температурный коэффициент обратимых изменений магнитной индукции (для современных высококоэрцитивных постоянных магнитов $b_T = 0,0005 \dots 0,0013$ $1/C^\circ$).

Формирование импульсов на выходе датчика частоты вращения происходит в моменты равенства угла поворота вала двигателя α значениям, кратным $2\pi/N$, где N – количество импульсов датчика за один оборот.

В работе [1] рассматривались САР частоты вращения с И- и АИ-регуляторами, обеспечивающими коррекцию системы и фильтрацию импульсных сигналов обратной связи по частоте вращения.

С учетом выражения (2) ограничения тока двигателя, импульсного характера датчика частоты вращения и возможного изменения напряжения питания запишем логические выражения и разностное уравнение, соответствующие И-регулятору:

$$t_1(n) = t_1(n-1) + h; \quad t_2(n) = t_2(n-1) + h; \quad (3)$$

если $\alpha > 2\pi/N$, то $T_{p1} = t_1(n)$, $t_1(n) = 0$ и если $c = 0$, то $\omega_1 = 2\pi/(NT_{p1})$, $T_{p2} = t_2(n)$ и $t_2(n) = 0$; (4)

$$\text{если } t_1(n) < \pi/(N\omega_{\max}), \text{ то } \omega_2 = 2\omega_{\max}, \text{ иначе } \omega_2 = 0; \quad (5)$$

$$\text{если } t_2(n) > aT_{p2}, \text{ то } \omega_1 = \omega_1/b, \quad T_{p2} = t_2(n), \quad t_2(n) = 0 \text{ и } c = 1; \quad (6)$$

$$u_{II}(n) = u_{II}(n-1) + k_P(x_3 - k_{OC}\omega_2)h; \quad \text{если } u_{II}(n) > U_{\max}, \text{ то } u_{II}(n) = U_{\max}; \quad (7)$$

$$\text{если } u_{II}(n) > U_3, \text{ то } u_q = U_3, \text{ иначе } u_q = u_{II}(n); \quad (8)$$

$$\text{если } \alpha > 2\pi/N, \text{ то } \alpha = 0, \quad (9)$$

где $t_1(n)$; $t_2(n)$ – состояния первого и второго таймеров; ω_2 – сигнал обратной связи по частоте вращения; T_{p1} , T_{p2} – периоды для определения сигналов частоты вращения; c – параметр для индикации режима работы двигателя; u_{II} – выходной сигнал И-регулятора; $k_{OC} = x_{\max}/\omega_{\max}$ – коэффициент обратной связи САР; $k_P = k_m/(4\xi^2 T_M k_{OC})$ – коэффициент передачи И-регулятора; ξ – коэффициент демпфирования; T_M – электромеханическая постоянная времени; n ; h – номер отсчета и период квантования; x_{\max} , ω_{\max} – максимальные зна-

чения задания и частоты вращения; U_{\max} – максимальное напряжение питания; a ; b – постоянные коэффициенты; начальные условия – $t_1(0) = 0$, $t_2(0) = 0$ и $c = 0$.

Выполним расчет переходных процессов тока статора и частоты вращения для основных режимов работы двигателя. При этом полагаем параметры двигателя и системы: $\omega_{\max} = 785 \text{ c}^{-1}$; $x_{\max} = 1$; $U_{\max} = 15 \text{ В}$; $k_m = 0,0098 \text{ кг} \times \text{м}^2 / \text{А} \times \text{с}^2$; $R = 0,4 \text{ Ом}$; $L = 0,00024 \text{ Гн}$; $J = 0,00000218 \text{ кг} \times \text{м}^2$; $M_C = M_{CH} \omega / \omega_{\max}$; $M_{CH} = 0,03 \text{ Н} \times \text{м}$; $\xi = 1/\sqrt{2}$; $I_3 = 5,8 \text{ А}$; $a = 1,25$; $b = 1,5$.

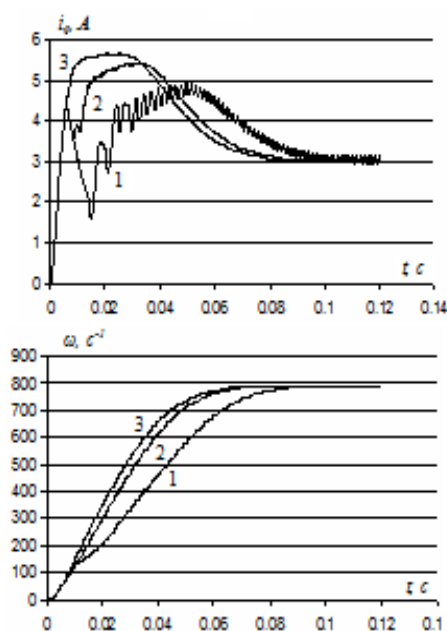


Рис. 1

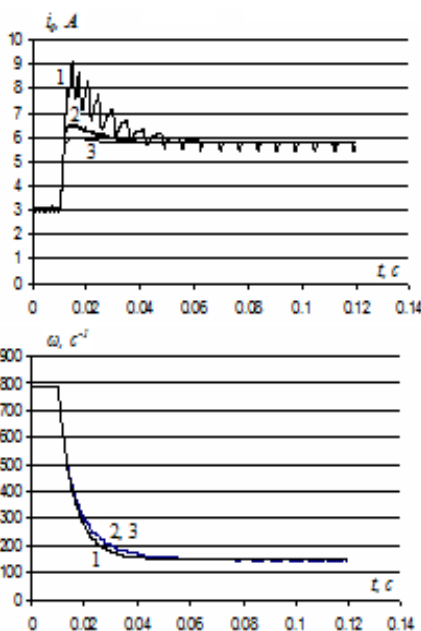


Рис. 2

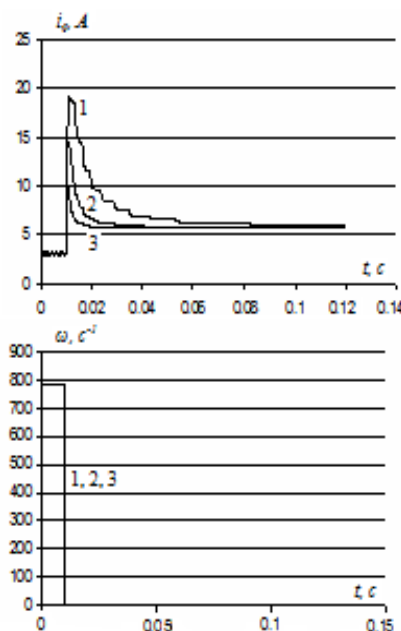


Рис. 3

На рис. 1–3 показаны соответственно кривые переходных процессов тока i_q статора и частоты вращения ω для трех режимов работы двигателя: пуска, скачкообразного изменения момента сопротивления механизма и мгновенной остановки. Графики рассчитаны при трех значениях количества импульсов за один оборот вала датчика частоты вращения: $N = 6; 24; 96$ (кривые 1, 2 и 3 соответственно). При изменении механической нагрузки (рис. 2) момент сопротивления меняется от заданного номинального до значения, равного $0,3 \text{ Н} \times \text{м}$. При мгновенной остановке частота вращения принимает нулевое значение (рис. 3).

Отметим, что условие (4) выполняется при пуске двигателя и в режиме скачкообразного изменения момента сопротивления нагрузки (рис. 1 и 2). Заметим, что ограничение момента (рис. 2) обеспечивается при десятикратном изменении нагрузки. Условие (6) выполняется в случае мгновенной остановки двигателя (рис. 3). Реализация такого алгоритма необходима, поскольку при прекращении вращения вала не формируются импульсы датчика частоты вращения и контроль частоты вращения двигателя прекращается. Интенсивность уменьшения тока в этом случае определяется параметрами a и b . Путем сравнения выходного сигнала И-регулятора $u_{II}(n)$ и расчетного напряжения U_3 при выполнении условия (8) осуществляется ограничение момента двигателя. Очевидно, что малое значение $N = 6$ определяет импульсный характер переходных процессов тока i_q статора.

Выводы. Таким образом, реализация описанного подхода обеспечивает ограничение момента БДПМ в основных режимах его работы при пуске, скачкообразном изменении момента сопротивления механической нагрузки и мгновенной остановке без использования датчиков токов. Проведенные исследования показали зависимость качества ограничения то-

ка от количества импульсов датчика частоты вращения за один оборот вала. Полученные результаты подтверждают возможность реализации описанного подхода при построении ЭМС малой мощности на основе БДПМ. Минимизация аппаратной части ЭМС на основе БДПМ актуальна при реализации встроенных приложений.

1. Акинин К.П. Сравнение способов построения импульсных систем регулирования частоты вращения бесконтактных магнитоэлектрических двигателей // Техн. електродинаміка. – 2008. – № 3. – С. 45–51.
2. Пересада С.М., Ковбаса С.Н., Алисов А.С. Общетеоретическое решение задачи управления механическими координатами электромеханических систем без измерения токов приводных двигателей // Проблемы автоматизованого електроприводу. Теорія і практика: Вісник Національного технічного університету «ХПІ»: Зб. наук. пр. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – С. 31–35.

УДК 621.313.17

К.П. Акинин, канд. техн. наук
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

Дослідження режиму обмеження моменту безконтактних двигунів з постійними магнітами без датчиків струму
Досліджено спосіб обмеження моменту безконтактних двигунів з постійними магнітами без використання датчиків струму. Запропоновано алгоритм обмеження моменту двигуна. Розглянуто основні режими обмеження моменту при пуску двигуна, стрибкоподібній зміні моменту навантаження та миттєвій зупинці двигуна при трьох значеннях кількості імпульсів датчика частоти обертання. Наведено графіки перехідних процесів струму статора та частоти обертання двигуна. Бібл. 2, рис. 3.

Ключові слова: електромеханічна система, електропривод, безконтактний двигун з постійними магнітами, обмеження моменту двигуна.

K.P. Akynin

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Research of torque limitation mode of permanent magnet brushless motors without current sensors

Torque limitation mode of permanent magnet brushless motors without current without using of current sensors is analysed. Motor torque limitation algorithm is proposed. Main modes of torque limitation when motor start, step load torque change and instantaneous motor stop when three values of the pulses quantity of motor angular speed sensor are considered. Transient response diagrams of motor stator current and angular speed are shown. References 2, figures 3.

Key words: electromechanical system, electric drive, permanent magnet brushless motor, motor torque limitation.

Надійшла 03.03.2014

Received 03.03.2014