

Энергоэффективное управление синхронным двигателем с постоянными магнитами

Д. С. Калий¹, А. А. Колесников², О. И. Якименко³

Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности Южного федерального университета
г. Таганрог

¹kaliy.d@yandex.ru, ²ankolesnikov@sfedu.ru, ³iakimenko_olga@mail.ru

Аннотация. В электромеханических преобразователях существует возможность изменять в определенных пределах уровень мощности потерь, не меняя ни конструкцию, ни режим работы двигателя. Добиться повышения энергетической эффективности электромеханических систем (ЭМС) можно с помощью совершенствования законов (алгоритмов) автоматического управления. Применение принципов автоматического управления способствует более гибкой организации электромеханических процессов, что приводит к определенному энергетическому выигрышу. Таким образом, к задачам автоматического управления можно отнести задачу поиска законов энергосберегающего управления, которые позволяют снизить, а в идеальном случае минимизировать уровень энергетических потерь определяемых характеристиками генерируемого механического движения. Потенциальная возможность оптимизации энергетических режимов электромеханических систем выявлена в работе [1] на основе анализа изменения составляющих потерь в зависимости от режима работы, где получены соотношения, которые можно отнести к энергетическим инвариантам ЭМС.

Ключевые слова: электромеханические системы; синхронный двигатель с постоянными магнитами; энергетический инвариант; энергоэффективное управление; метод АКАР; синтез регулятора

I. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Прогресс в области магнитных материалов, силовых электронных устройств и теории управления приводит к тому, что синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) играют все более важную роль в промышленности. Вследствие их повышенной эффективности, больших значений крутящего момента при малых массогабаритных показателях по сравнению с асинхронными двигателями СДПМ широко используются в электромобилях и гибридных автомобилях [2, 3].

Наиболее подходящие системы управления для приводов с СДПМ – это векторное управление и прямое управление моментом [4–7]. Обе системы контролируют момент и магнитный поток для точной отработки

заданных режимов, несмотря на изменение параметров двигателя и нагрузки при различных возмущающих воздействиях.

Математическая модель [8], описывающая динамику синхронного электродвигателя с постоянными магнитами записана в системе координат, жестко связанной с ротором.

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= -R_s x_1 / L_d + n_p x_3 x_2 + u_{1ed} / L_d; \\ \dot{x}_2 &= -n_p x_3 x_1 - R_s x_2 / L_q - n_p \psi_f x_3 / L_q + u_{2ed} / L_q; \\ \dot{x}_3 &= (1,5 n_p \psi_f x_2 - B x_3) / J_e,\end{aligned}\quad (1)$$

где $x_1 = i_d$ – проекция тока статора на ось d;

$x_2 = i_q$ – проекция тока статора на ось q;

$x_3 = \omega$ – угловая скорость вращения ротора;

$u_{1ed} = u_d$ – проекция напряжения статора на ось d;

$u_{2ed} = u_q$ – проекция напряжения статора на ось q;

$M_{ed} = 1,5 n_p \psi_f i_q$ – электромагнитный момент двигателя.

$M_c = B \omega$ – момент нагрузки задан в качестве момента вязкого трения.

Параметры электродвигателя: ψ_f – потокосцепление ротора; n_p – количество пар полюсов; R_s – сопротивление статора; L_d, L_q – проекции индуктивности обмотки статора на оси d и q; J_e – момент инерции; B – коэффициент вязкого трения.

II. ОПИСАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИНВАРИАНТА ДЛЯ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Способы формирования энергетических инвариантов основаны на идее поиска экстремума функции потерь энергии в электрической машине по одной из ее переменных. При этом функция потерь формируется как сумма частных потерь или как разность потребляемой и

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект №18-08-00924 А

полезной мощности и записывается в переменных используемой при синтезе математической модели [9].

Энергетические инварианты, представляют собой соотношения между переменными ЭМС, характеризующие наиболее выгодные в энергетическом плане режимы ее работы и связанные с эффективностью процессов электрохимического преобразования энергии (минимум потерь энергии, минимум потребляемой мощности, максимальный коэффициент мощности).

Очевидно, что наиболее эффективным с энергетической точки зрения является режим работы ЭМС, при котором потери энергии в его силовых каналах минимальны. В дальнейшем под энергетическим инвариантом подразумевается некоторое соотношение, которое определенным образом связывает физические переменные системы (переменные, используемые в математическом описании объекта) и характеризует режим минимальных потерь энергии.

Для синхронного двигателя с постоянными магнитами с неявнополюсным ротором мощность электрических потерь равна $P_s = (i_d^2 + i_q^2)R_s$, мощность магнитных потерь записывается в виде следующей усредненной формулы: $P_{cm} = P_{cm\text{ ном}} (\omega / 314)^\beta (\psi / \psi_n)^2$, где $P_{cm\text{ ном}}$ – номинальные потери в стали, ψ_n — номинальное потокосцепление статора, $\psi = \sqrt{\psi_d^2 + \psi_q^2}$, $\psi_d = n_p (\psi_f + L_d i_d)$, $\psi_q = n_p i_q L_q$. Мощность суммарных потерь записывается в виде суммы электрических и магнитных потерь $\Delta P_\Sigma = \Delta P_s + \Delta P_{cm}$.

Далее вычисляется производная суммарной мощности по одной из переменных состояния модели. Так как переменная i_q непосредственно входит в формирование электромагнитного момента, а, следовательно, и в формирование угловой скорости вращения ротора электродвигателя, для энергосберегающего управления регулируется переменная i_d , по данной переменной и записывается функция суммарной мощности потерь электродвигателя.

Из третьего уравнения модели (1) в стационарном режиме выражается переменная $i_q = B_w / 1.5 n_p \psi_f$. При подстановке данного выражения в уравнение мощности суммарных потерь получается функция потерь от переменной i_d . Находится производная полученной функции по переменной i_d и приравняется к нулю. В итоге при выражении переменной i_d из полученной производной находится аналитическое выражение, характеризующее оптимальное с точки зрения минимума потерь энергии значение переменной i_d :

$$i_d^* = -2L_d P_{cm\text{ ном}} n_p^2 (\omega / 314)^\beta \psi_f / \psi_n^2 (2R_s + (2L_d^2 P_{cm\text{ ном}} n_p^2 (\omega / 314)^\beta) / \psi_n^2) \quad (2)$$

III. СИНТЕЗ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ

В связи с нелинейностью математической модели объекта и наличием векторного управления для синтеза законов управления был применен метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) синергетической теории управления [10, 11].

Для энергоэффективного управления необходимо как минимум наличие двух каналов управления: один для выполнения технологической задачи, второй непосредственно для минимизации энергетических потерь в двигателе.

В представленной модели (1) одним каналом управления регулируются обороты электродвигателя, чему в модели соответствует переменная x_3 , вторым каналом управления стабилизируется проекция тока на продольную ось статора d , переменная x_1 .

Так как в уравнение проекции тока на ось d входит управляющее воздействие, первое инвариантное многообразие вводится непосредственно на основании цели управления. В уравнении скорости вращения электродвигателя управляющее воздействие отсутствует, поэтому в многообразии вводится неизвестная функция для декомпозиции исходной математической модели:

$$\begin{aligned} \psi_1 &= x_1 - x_1^* = 0, \\ \psi_2 &= x_2 - \varphi_1 = 0, \end{aligned}$$

где φ_1 — неизвестная функция, которая является внутренним управлением для декомпозированной математической модели, $x_1^* = i_d^*$ (2).

Декомпозированная модель имеет вид:

$$\dot{x}_3 = (1.5 n_p \psi_f \varphi_1 - B x_3) / J_e.$$

Теперь в уравнении скорости вращения электродвигателя присутствует управляющее воздействие φ_1 . Далее вводится следующее инвариантное многообразие:

$$\psi_3 = x_3 - x_3^* = 0,$$

решается функциональное уравнение:

$$T_{3ed} \dot{\psi}_3(t) + \psi_3 = 0,$$

находится φ_1 , подставляется в ψ_2 и решается система функциональных уравнений:

$$\begin{aligned} T_{1ed} \dot{\psi}_1(t) + \psi_1 &= 0, \\ T_{2ed} \dot{\psi}_2(t) + \psi_2 &= 0, \end{aligned}$$

таким образом находятся управляющие воздействия u_{1ed}, u_{2ed} .

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 1–4 представлены графики моделирования замкнутой системы управления синхронным электродвигателем с постоянными магнитами. Цели управления: $x_1^* = i_d^*$, $x_3^* = 2000 \text{ об/мин}$.

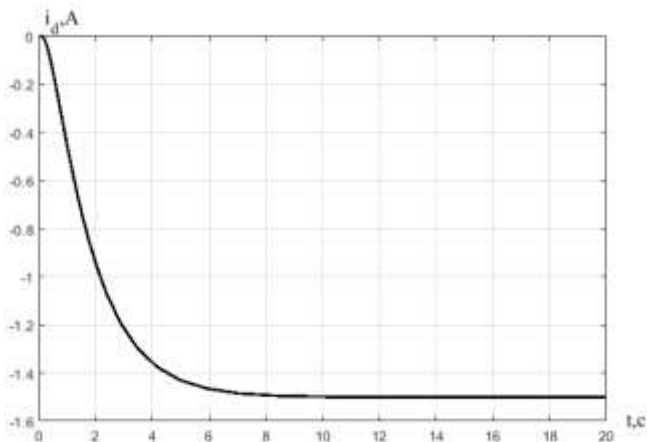


Рис. 1. График проекции тока на ось d

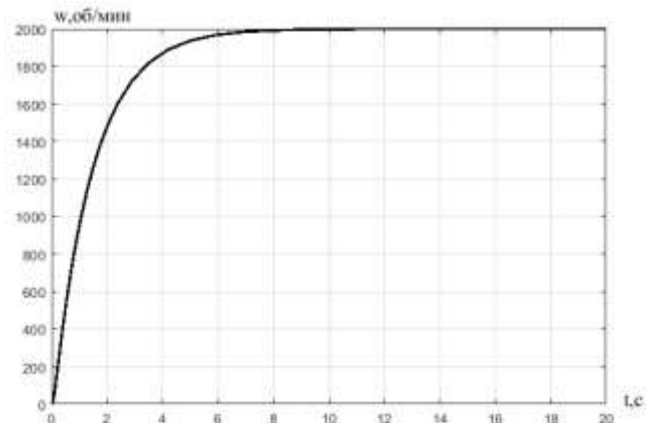


Рис. 2. График скорости вращения ротора

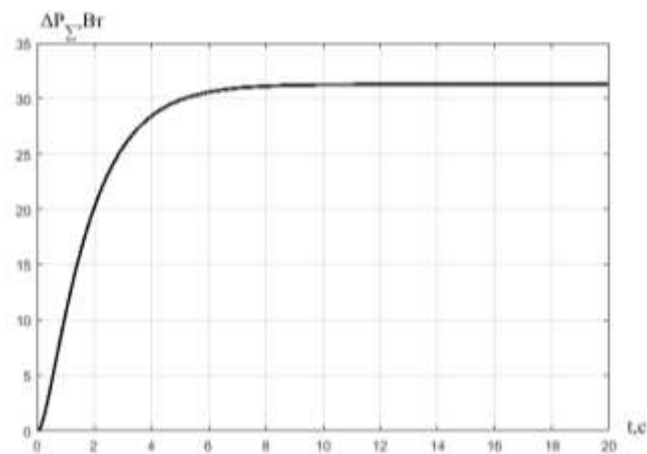


Рис. 3. График мощности суммарных потерь энергии

По графикам видно, что цели синтеза выполняются – проекция тока по оси d и скорость вращения ротора стабилизируются в желаемых значениях.

В большинстве случаев при управлении СДПМ с неявнополюсным ротором проекцию тока по оси d поддерживают в нулевом значении, так как она не входит в формирование электромагнитного момента и это обеспечит минимальное потребление реактивной мощности.

На рис. 4 приведено сравнение суммарных потерь энергии при оптимальном регулировании переменной i_d и стабилизации данной переменной в нулевом значении. На рис. 5 приведены сравнение коэффициентов полезного действия (КПД) на различных скоростях вращения ротора двигателя.

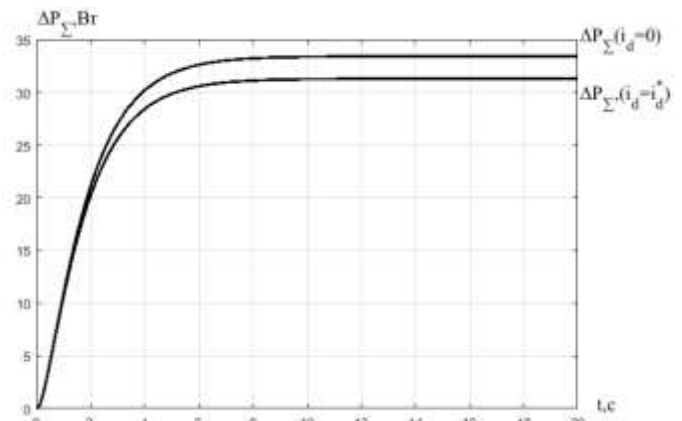


Рис. 4. График сравнения мощностей суммарных потерь энергии

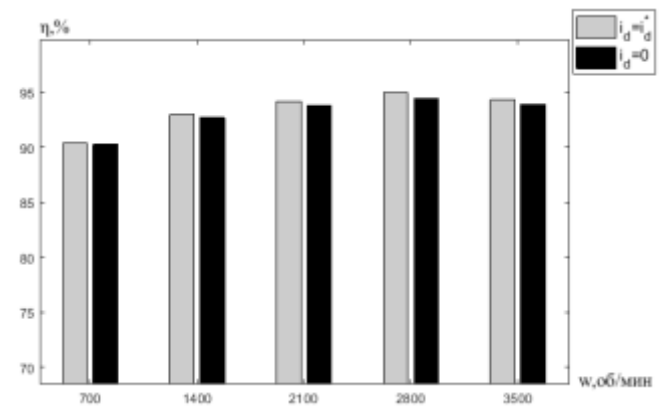


Рис. 5. График сравнения КПД

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье изложены результаты синтеза законов управления синхронным электродвигателем с постоянными магнитами на основе синергетического подхода. Также представлены графики моделирования синтезированной системы. По графикам видно достижение поставленных целей управления и минимизации энергетических потерь в электрической машине. Таким образом, используя незадействованный в технологических

задачах канал управления, можно регулировать одну из электромагнитных переменных объекта для энергоэффективного управления электромеханическими преобразователями, что показывает возможность уменьшения энергетических потерь не только с помощью улучшения конструкции электромеханических преобразователей, но и с помощью использования принципов автоматического управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Ильинский Н.Ф., Рожанковский Ю.В., Горнов А.О. Энергосберегающая технология электроснабжения народного хозяйства: Практическое пособие / Под ред. В.А. Веникова. Кн. 2. Энергосбережение в электроприводе. М.: Высш. Школа, 1989. 127 с.
- [2] ZQ Zhu, David Howe. Electrical machine and drives for electric, hybrid, and fuel cell vehicles. *Proceedings of IEEE* 2007; vol.95, no.4, pp.746-765
- [3] Y Zhao, W Qiao, L. Wu. An adaptive quasi-sliding-mode rotor position observer-based sensorless control for interior permanent magnet synchronous machines. *IEEE Trans Power Electron*, 2013; vol.28, no.12, pp. 5618-5629.
- [4] Shyu K.K. A Newly Robust Controller Design for the Position Control of Permanent Magnet Synchronous Motor / K.K. Shyu, C.K. Lai, Y.W. Tsai // *IEEE Trans. Industrial Electronics*, 2002. Vol. 49. № 3. Pp. 558–565.
- [5] Mohamed, R. Direct Instantaneous Torque Control in Direct Drive Permanent Magnet Synchronous Motors – a New Approach / R. Mohamed // *IEEE Trans. Energy Conversion*, 2007. Vol. 22. № 4. Pp. 829–838.
- [6] Rahman, M. A direct torque controlled interior permanent magnet synchronous motor drive without a speed sensor / M. Rahman, L. Zhong, M. Haque // *IEEE Trans. Energy Conversion*, 2003. Vol. 18. № 1. Pp. 17–22.
- [7] Hiren M. Comparative study of field oriented control and direct torque control of induction motor / M. Hiren, T. Pankit, V. Hemangini // *Journal of information knowledge and research in electrical engineering*, 2011. Vol. 1. № 2. Pp. 44–50.
- [8] Qiang S. Robust Speed Controller Design for Permanent Magnet Synchronous Motor Drives Based on Sliding Mode Control / S. Qiang, J. Chao // *Energy Procedia*. 2016. №88. Pp. 867–873.
- [9] Попов А.Н. Синергетический синтез законов энергосберегающего управления электромеханическими системами. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2003. 78 с.
- [10] Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза. М: Едиториал УРСС / КомКнига, 2012. 240 с.
- [11] Колесников А.А. Синергетическая теория управления. М.: Энергоатомиздат, 1994. 344 с.