

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМИ СИСТЕМАМИ. СИНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ЭКОМОБИЛЕЙ

УДК 681.513.5

РОБАСТНОЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ СИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ГИБРИДНОГО АВТОМОБИЛЯ

С.Г. Деев, ст. преп., Е.М. Потапенко, д.т.н, проф, ЗНТУ

***Аннотация.** Предложен метод синтеза робастной энергосберегающей системы управления синхронным электроприводом гибридного автомобиля. Предлагаемый метод управления обеспечивает формирование электромагнитного момента с минимизацией потребляемой мощности.*

***Ключевые слова:** синхронный двигатель, робастное управление, минимизация потерь мощности.*

ОПТИМАЛЬНЕ РОБАСТНЕ КЕРУВАННЯ ТЯГОВИМ АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ГІБРИДНОГО АВТОМОБІЛЯ

С.Г. Деев, ст. викл., Є.М. Потапенко, д.т.н, проф, ЗНТУ

***Анотація.** Запропоновано метод синтезу робастної енергосберегаючої системи керування синхронним електроприводом гібридного автомобіля. Пропонований метод керування забезпечує формування електромагнітного моменту з мінімізації споживаної потужності.*

***Ключові слова:** синхронний двигун, робастне керування, мінімізація втрат потужності.*

ROBUST CONTROL ENERGY SAVING SYNCHRONOUS ELECTRIC HYBRID CARS

S.G. Deyev, E.M.Potapenko, Zaporizhzhya National Technical University

***Abstract.** It's proposed a method for the synthesis of robust synchronous electric energy-saving control hybrid cars. The proposed control method provides for the formation of the electromagnetic torque while minimizing power consumption.*

***Key words:** synchronous motor, robust control, minimizing power losses.*

Введение

Синхронные электродвигатели с постоянными магнитами (СДПМ) по динамическим и эксплуатационным характеристикам при применении в гибридных автомобилях (ГА) [1, 2] имеют ряд преимуществ по сравнению с другими типами электродвигателей и перспективны для использования. Условия экс-

плуатации в таких случаях отличаются наличием неопределённостей в самих электроприводах и внешних воздействиях на него [3, 6, 7]. При этом актуальной является задача энергосбережения и минимизации потребляемой мощности. Вопросы минимизации потребляемой мощности ранее рассмотрены, например, в работах [1, 2, 4, 5].

Цель работы

Синтез и анализ методов энергосберегающего робастного управления синхронным электроприводом на основе явнополюсного СДПМ силовой установки гибридного автомобиля.

Материалы и результаты исследований

1. Электропривод с СДПМ описывается следующей системой уравнений, записанных в синхронном базисе (d, q) , связанном с вектором потокоцепления магнита [3]

$$I\ddot{\varphi} = m + m_1, \quad (1)$$

$$m = 1,5Z_p[\Psi_m i_q + (L_d - L_q)i_d i_q], \quad (2)$$

$$u_d = L_d p i_d + R_s i_d - L_q i_d \omega_e, \quad (3)$$

$$u_q = L_q p i_q + R_s i_q + L_d i_d \omega_e + \omega_e \Psi_m, \quad (4)$$

где I – момент инерции ротора двигателя, φ – угол поворота ротора, m – электромагнитный момент двигателя, m_1 – неизвестный момент нагрузки, Z_p – число пар полюсов, Ψ_m – магнитный поток, создаваемый постоянным магнитом, ω_e – электрическая угловая скорость ротора, L_d, L_q – индуктивности, i_d, i_q – составляющие токов статора, идущие на создание электромагнитного момента, u_d, u_q – напряжения, R_s – активное сопротивление меди статора, p – оператор дифференцирования.

2. Минимизация потерь в электроприводе. Электрические потери в электроприводе включают потери в меди и стали [4, 5]

$$\Delta P = 1,5R_s(i_{ds}^2 + i_{qs}^2) + 1,5R_c(i_{dc}^2 + i_{qc}^2), \quad (5)$$

где R_c – сопротивление, характеризующее потери в стали, i_{ds}, i_{qs} – полные токи статора, i_{dc}, i_{qc} – части составляющих токов статора, соответствующие потерям в стали, по осям d и q , при этом

$$i_{ds} = i_{dc} + i_d, \quad i_{qs} = i_{qc} + i_q. \quad (6)$$

Токи, соответствующие потерям в стали [4], определяются выражениями

$$i_{dc} = -\frac{\omega_e L_q i_q}{R_c}, \quad i_{qc} = \frac{\omega_e(\Psi_m + L_d i_d)}{R_c}. \quad (7)$$

С учётом (6) и (7) выражение (5) принимает вид

$$\Delta P = 1,5R_s \left(\left(i_d - \frac{\omega_e L_q i_q}{R_c} \right)^2 + \left(i_q - \frac{\omega_e(\Psi_m + L_d i_d)}{R_c} \right)^2 \right) + 1,5R_c \left(\left(-\frac{\omega_e L_q i_q}{R_c} \right)^2 + \left(\frac{\omega_e(\Psi_m + L_d i_d)}{R_c} \right)^2 \right). \quad (8)$$

Сложность оптимизации по выражению (8) заключается в зависимости потерь мощности от двух переменных i_d и i_q . Для упрощения оптимизации на основании выражения (2) вводится новая переменная k так, чтобы можно было записать

$$i_d = \frac{k - \Psi_m}{L_d - L_q}, \quad i_q = \frac{m}{1,5Z_p k}. \quad (9)$$

Справедливость такой замены подтверждается подстановкой (9) в выражение (2), при этом получается тождество $m \equiv m$. Для минимизации потерь в выражение (8) подставляются зависимости (9).

Значение k , при котором электрические потери в электроприводе будут минимальными, определяется из уравнения

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial k} = 0. \quad (10)$$

Найденное значение k с помощью выражений (11) позволяет определить значения программных токов i_{dp} и i_{qp} , соответствующих минимуму потерь.

На рис. 1 показана зависимости оптимального значения параметра k от угловой скорости ротора при различных значениях момента нагрузки, рассчитанная по данным электропривода [3]: $L_q = 12,5 \text{ мГн}$, $L_d = 5,7 \text{ мГн}$, $\Psi_m = 0,123 \text{ мВб}$, $R_s = 1,2 \text{ Ом}$, $R_c = 416 \text{ Ом}$, $n = 3500 \text{ об/мин}$, $m = 2,4 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

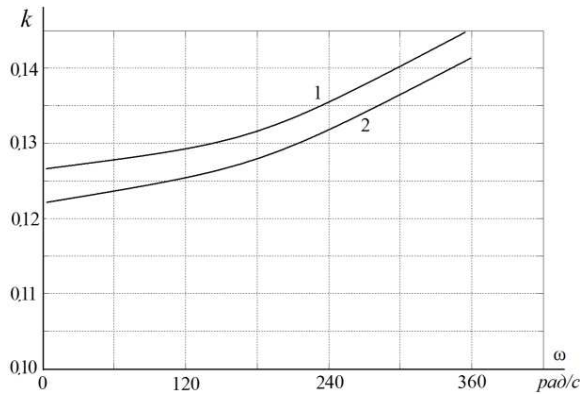


Рис. 1. Зависимости изменения параметра k от угловой скорости электропривода с СДПМ при номинальной нагрузке (1) и без нагрузки (2).

Зависимости электрических потерь в СДПМ от скорости двигателя при различных значениях момента нагрузки при оптимальных значениях параметра k приведена на рис.2.

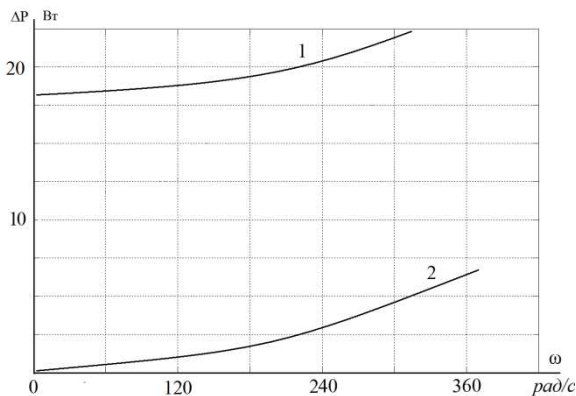


Рис. 2. Зависимости электрических потерь ΔP от угловой скорости электропривода с СДПМ при номинальной нагрузке (1) и без нагрузки (2).

Как следует из рис. 1, оптимальное значение параметра k для явнополюсных СДПМ относительно мало зависит от значений скорости и момента.

3. Регуляторы контуров тока. В приводе используются два робастных регулятора токов i_d и i_q , аналогичных регуляторам, рассмотренным в работах [3, 6]. Каждый из регуляторов тока включает в себя собственно регулятор и компенсатор с наблюдателем неопределённости. Датчики тока измеряют полный ток, состоящий из моментного тока и тока, соответствующего потерям в стали и меди [4, 7]. В регуляторах токи потерь в ста-

ли, погрешности и изменения, связанные с отклонением от номинальных параметров и влиянием перекрёстных связей, включены в неопределённости, которые оцениваются и компенсируются. В результате на выходе регуляторов тока формируются напряжения в базисе (d, q) , которые после преобразования в трёхфазный базис ABC, используются в качестве управляющих сигналов для инвертора. Исходная система (1–4), с учётом вышесказанного, представляется в виде системы с номинальными значениями параметров, на которую действует вектор неопределённости f_i , а именно

$$p i_{dq} = -(T'_{s0})^{-1} i_{dq} + k_0 u_{dq} + \hat{f}_i, \quad (11)$$

где P – оператор дифференцирования, k_0 – коэффициент передачи преобразователя. Для каждого контура тока синтезирован наблюдатель [5].

$$p \hat{i} = -(T'_{s0})^{-1} \hat{i} + k_0 u_p + \hat{f}_i + l_1 (\hat{i} - i), \quad (12)$$

$$p \hat{f}_i = l_2 (\hat{i} - i), \quad (13)$$

где l_1, l_2 – постоянные коэффициенты наблюдателя.

Закон управления регулятора тока имеет вид

$$u_p = k_0^{-1} [v (i_p - \hat{i}) - \hat{f}_i], \quad (14)$$

где v – постоянный коэффициент.

4. Функциональная схема системы управления электроприводом показана на рис. 3. Блок оптимизации 3, на который подаётся задание момента m_0 , обеспечивает расчёт оптимальных программных токов i_{dp} и i_{qp} . Регуляторы токов и компенсаторы неопределённости контуров токов i_d, i_q 6, 7 и 4, 5 соответственно построены по уравнениям (12)–(14). Регуляторы тока формируют программные напряжения в осях d, q , которые после преобразования в трехфазную форму подаются на инвертор в качестве управляющих сигналов.

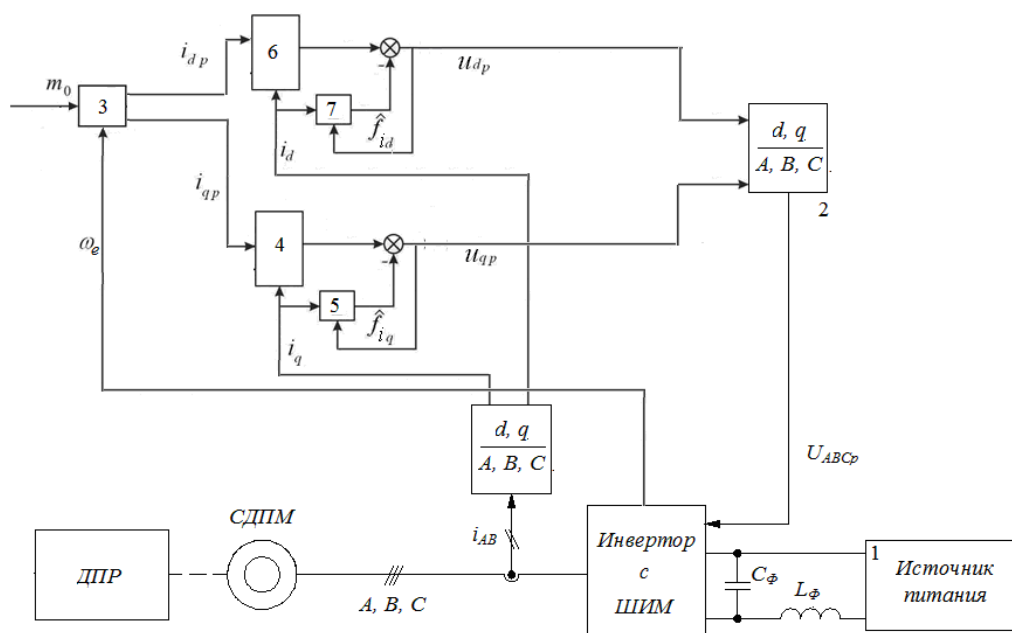


Рис. 2. Функциональная схема системы управления электроприводом

Выводы

1. Получена зависимость потерь мощности (8) от составляющих статорных токов, формирующих электромагнитный момент.
2. Предложено преобразование, позволяющее вместо выражения потерь мощности через токи i_d и i_q , получить зависимость этих потерь от одной переменной k , что существенно упрощает задачу оптимизации.
3. Предложенный метод формирования статорных токов по критерию минимума потребляемой мощности обеспечивает формирование заданного электромагнитного момента и минимизацию энергопотребления в реальном времени.
4. Робастность и простота управления обеспечиваются за счёт применения робастных регуляторов статорных токов.
5. Предложен метод синтеза робастного энергосберегающего управления синхронным электроприводом.

Литература

1. Нгуен Куанг Тхиеу. Развитие теории и методы повышения энергоэффективности однодвигательных тяговых электроприводов автотранспортных средств: автореф. дис. на соискание научн. степени

доктора техн. наук: спец. 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы». – Москва, 2012. – 40 с.

2. Синергетичний автомобіль. Теорія і практика / [Бажинов О.В., Смирнов О.П., Серіков С.А., Двядненко В.Я.]. – Харків: ХНАДУ, 2011. – 236 с.
3. Деев С.Г. Принципы формирования робастного управления синхронным электроприводом / С.Г. Деев, Е.М. Потапенко // Тематический выпуск «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика». – Київ: Техника. – 2011. – №3. – С. 58–59.
4. Vaez S., John V.I., Rahman V.A. An On-line loss Minimization Controller for Interior Permanent Magnet Motor Drives. IEEE TRANSACTIONS on Energy Conversion, 1999, №4, p.1435-1440.
5. Monajemy R. Control and Dynamics of Constant Power Loss Based Operation of Permanent Magnet Motor Drive System. IECON'99. The 25th Annual conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 1999, p.1-6
6. Потапенко Е.М. Робастные алгоритмы векторного управления асинхронным приводом / Е.М. Потапенко, Е.Е. Потапенко. – Запорожье: ЗНТУ. – 2009. – 352 С.

Рецензент: С.А. Сериков, доцент, к.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 17 сентября 2013 г.