

УДК 681.527.2

МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД АВТОМОБИЛЯ С ГИБРИДНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКОЙ

С. Г. Деев

Запорожский национальный технический университет

ул. Жуковского, 64, г. Запорожье, 69063, Украина. E-mail: sgd1968@mail.ru

Рассмотрены энергетические, регулировочные характеристики и метод формирования момента многодвигательного синхронного электропривода гибридного автомобиля. Предложены принципы построения робастных систем управления электроприводом при использовании комбинированных методов управления с оценкой и компенсацией неопределённости внешних воздействий, механических и электрических параметров электропривода.

Ключевые слова: гибридная силовая установка, многодвигательный электропривод, алгоритм управления, энергосбережение.

БАГАТОДВИГУНЕВИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД АВТОМОБІЛЯ З ГІБРИДНОЮ СИЛОВОЮ УСТАНОВКОЮ

С. Г. Деев

Запорізький національний технічний університет

вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69063, Україна. E-mail: sgd1968@mail.ru

Розглянуто енергетичні, регульовальні характеристики і метод формування момента багатодвигуневого синхронного електропривода гібридного автомобіля. Запропоновано принципи побудови робастних систем управління електроприводом при використанні комбінованих методів управління з оцінкою й компенсацією невизначеностей зовнішніх впливів, механічних та електричних параметрів електропривода.

Ключові слова: гібридна силова установка, багатодвигуневиий електропривод, алгоритм управління, енергосбереження.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. В настоящее время широкое развитие получили автомобили с гибридными силовыми установками (ГСУ) на основе двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и электропривода. Достаточно широко распространены в ГСУ многодвигательные электроприводы с двумя и более тяговыми электродвигателями [1]. Как правило, в электроприводе ГСУ используют синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ), что определяется, в первую очередь, экономичностью и массогабаритными показателями [2]. При управлении электроприводами гибридных автомобилей дополнительную сложность представляют необходимость регулирования скорости в широком диапазоне с ограниченным напряжением источника питания и переменность момента инерции, приведенного к валу тягового электродвигателя, вызванная изменением массы автомобиля и передаточного числа коробки передач. Кроме того, необходимо учитывать разброс параметров электродвигателей и других элементов привода и возможность значительных провалов напряжения питания из-за уменьшения напряжения аккумулятора. Таким образом, представляется целесообразным изучение возможности применения в ГСУ рассмотренных ранее в работе [3] синхронных многодвигательных электроприводов.

Целью работы является исследование энергетических и регулировочных характеристик многодвигательного синхронного электропривода ГСУ и синтез алгоритмов управления электроприводом, обеспечивающих повышенную надёжность, точность, экономичность, расширенный диапазон регулирования скорости при ограничении напряжения источника питания.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

1. *Формирование электромагнитного момента электропривода ГСУ.* С учётом изложенного выше, используем робастный формирователь момента электропривода ГСУ с комбинированным управлением и компенсацией неопределённости. Рассмотрим вращение тела с неизвестным моментом инерции, подверженного неопределённому внешним воздействиям. Вращение осуществляется с помощью k однотипных тяговых электродвигателей ГСУ, имеющих различные неизвестные отклонения параметров от их номинальных значений. Моменты, создаваемые тяговыми электродвигателями, передаются на общий вал через одинаковые редукторы с передаточным числом q . Уравнение вращения описанной системы имеет вид:

$$J \ddot{\vartheta} = q \sum_{i=1}^k m_i + m_l, \quad (1)$$

где J , ϑ – приведенный момент инерции и угол поворота системы, m_i – электромагнитный момент i -го двигателя, m_l – неизвестный момент нагрузки.

Пусть J_0, m_{i0} – номинальные известные значения, $J_\delta, m_{i\delta}$ – отклонения от номинальных значений. С учетом принятых обозначений уравнение (1) примет вид:

$$J \ddot{\vartheta} = q \sum_{i=1}^k m_{i0} + f, \quad (2)$$

где неопределенность

$$f = -J_\delta + q \sum_{i=1}^k m_{i\delta} + m_l. \quad (3)$$

Уравнение (2) представляет собой уравнение полностью детерминированного объекта с номинальными параметрами, подверженного действию суммарной неопределенности f . Из (2) следует:

$$f = J_0 \ddot{\vartheta} - q \sum_{i=1}^k m_{i0}.$$

Задача состоит в оценке неопределенности f , входящей в уравнение (2), и ее компенсации. Рассмотрим решение этой задачи с помощью комбинированного управления с компенсацией неопределенности, описанного в работе [4]. Оценим неопределенность

$$y_f = f = J_0 \ddot{\vartheta} - q \sum_{i=1}^k m_{i0}. \quad (4)$$

При достаточном быстродействии наблюдателя можно положить:

$$\dot{\hat{f}} = 0.$$

В этом случае уравнение наблюдателя будет иметь вид:

$$\dot{\hat{f}} = L(\hat{f} - y_f). \quad (5)$$

Сформируем комбинированный закон управления в виде [3]:

$$q \sum_{i=1}^k m_{i0} = m_{00} - \hat{f}. \quad (6)$$

Подстановка (5) в (2) даёт:

$$J_0 \ddot{\vartheta} = m_{00} - \hat{f} + f. \quad (7)$$

При достаточно точной оценке неопределенности вместо уравнения (7) можно рассматривать невозмущенное уравнение:

$$J_0 \ddot{\vartheta} = m_{00}. \quad (8)$$

Отслеживание заданной траектории уравнения (12) обеспечивается за счет закона управления:

$$m_{00} = J_0 \ddot{\vartheta} - k_1(\dot{\vartheta} - \dot{\vartheta}_p) - k_2(\vartheta - \vartheta_p), \quad (9)$$

где k_1, k_2 – коэффициенты управления, ϑ_p – программное движение.

Подстановка (9) в (8) приводит к уравнению:

$$J_0(\ddot{\vartheta} - \ddot{\vartheta}_p) + k_1(\dot{\vartheta} - \dot{\vartheta}_p) + k_2(\vartheta - \vartheta_p) = 0. \quad (10)$$

Выбор коэффициентов формирователя момента электропривода ГСУ осуществляется с помощью стандартных полиномов.

Таким образом, суммарный управляющий момент (6) можно считать известным. При равномерном распределении управляющего момента между k однотипными двигателями с идентичными редукторами требуемый электромагнитный момент каждого двигателя определяется выражением:

$$m_{0i} = (kq)^{-1} m_0.$$

В случае, если используются разнотипные электродвигатели, распределение между ними сформированного задания момента несколько усложняется,

т.к. возникает необходимость в блоке распределения задания момента для каждого электродвигателя с учётом их характеристик. Усложнение не носит принципиального характера.

Регуляторы контуров тока могут быть выполнены по схеме, предложенной в [5]. Для этого представим исходную систему, описывающую СДПМ, в виде номинальной модели, на которую действует вектор неопределенности f_{dq} :

$$p i_{dq} = -(T'_{s0})^{-1} i_{dq} + k_0 u_{dq} + f_{dq}; \quad (11)$$

$$k_0 = k_1 (\sigma L_{s0})^{-1}, T'_{s0} = \sigma L_{s0} (R_{s0})^{-1}; \quad (12)$$

$$f_d = L_{d\delta} p i_d + R_{s\delta} i_d - L_q i_q n \omega; \quad (13)$$

$$f_q = L_{q\delta} p i_q + R_{s\delta} i_q + L_d i_d n \omega + n \omega \psi_{m\delta}, \quad (14)$$

где k_0 – коэффициент передачи преобразователя частоты, $i_{dq} = [i_d, i_q]^T$, $u_{dq} = [u_d, u_q]^T$, $f_{dq} = [f_d, f_q]^T$. Все коэффициенты и переменные в (11), за исключением $p i_{dq}$ и f , считаются известными. В коэффициентах уравнений (11)–(14) выделены номинальные составляющие с индексом 0 и неопределенности с индексом δ . Для каждого контура тока синтезирован наблюдатель:

$$p \hat{i} = -(T'_{s0})^{-1} \hat{i} + k_0 u_p + \hat{f} + l_1(\hat{i} - i); \quad (15)$$

$$p \hat{f} = l_2(\hat{i} - i), \quad (16)$$

где l_1, l_2 – постоянные коэффициенты наблюдателя.

При правильном выборе коэффициентов l_1, l_2 $\hat{f} \rightarrow f$, $\hat{i} \rightarrow i$. Регулятор контура тока задаётся в виде

$$u_p = k_0^{-1} [q(i_p - \hat{i}) - \hat{f}], \quad (17)$$

где q – постоянный коэффициент.

2. Энергетические характеристики.

Рассмотрим многодвигательный синхронный электропривод ГСУ. Уравнения работы i -го двигателя представляются в базисе (d_i, q_i) , связанном с ротором, где ось d_i совпадает с вектором магнитного потока магнитов ψ_{mi} , а ось q_i – перпендикулярна ему. Электромагнитный момент определяется выражением [3]:

$$m_i = n \psi_{mi} i_{qi}. \quad (18)$$

В случае, если в электроприводе используются k однотипных двигателей, активная мощность, потребляемая электроприводом [3]:

$$P_{ak} = \sum_{i=1}^k P_{ai} = R_{si} (n \psi_{mi})^{-2} \sum_{i=1}^k m_i^2 + \dot{\vartheta} m = R_{si} (n \psi_{mi})^{-2} k \left(\frac{m}{k}\right)^2 + \dot{\vartheta} m = R_{si} (n \psi_{mi})^{-2} \frac{m^2}{k} + \dot{\vartheta} m. \quad (19)$$

Активная мощность одного двигателя того же типа, создающего тот же самый электромагнитный момент:

$$P_{a1} = R_{si} (n \psi_{mi})^{-2} m^2 + \dot{\vartheta} m. \quad (20)$$

Сравнение выражений (19) и (20) показывает, что при использовании в электроприводе ГСУ k однотипных двигателей потери в меди в k раз меньше, чем при использовании одного двигателя.

3. Регулировочные характеристики.

Модуль вектора напряжения статора СДПМ не должен превышать напряжения источника питания гибридного автомобиля либо выходного напряжения повышающего преобразователя, если он применяется, т.е.:

$$|u_{PVMI}| > |u_i|.$$

В установившемся режиме, как показано в [3], квадрат модуля напряжения статора СД при отсутствии магнитного насыщения описывается уравнением:

$$|u_{PVMI}|^2 = (\dot{\vartheta}_i nL_{qi} m(n\psi_{mi})^{-1})^2 + (R_{si} m(n\psi_{mi})^{-1} + \dot{\vartheta}_i m\psi_{mi})^2, \quad (21)$$

где m – требуемый электромагнитный момент привода. В случае применения электропривода ГСУ, состоящего из k двигателей, будем иметь:

$$|u_{PVMI}|^2 = (\dot{\vartheta}_k nL_{qi} m(k\psi_{mi})^{-1})^2 + (R_{si} m(k\psi_{mi})^{-1} + \dot{\vartheta}_k m\psi_{mi})^2. \quad (22)$$

Сравнение полученных выражений подтверждает то, что при использовании однотипных двигателей диапазон регулирования многодвигательного привода больше диапазона регулирования однодвигательного привода, что позволяет в ряде случаев отказаться от использования повышающего преобразователя напряжения.

ВЫВОДЫ. Применение в ГСУ рассмотренного в работе многодвигательного синхронного электропривода вместо однодвигательного позволяет сни-

зить энергопотребление и расширить диапазон регулирования скорости.

Разработаны методы управления многодвигательным электроприводом ГСУ, обеспечивающие его робастность по отношению к неопределенности приведенного момента инерции, ко всем видам внешних воздействий на электропривод, к отклонениям от номинальных значений параметров электропривода и провалов напряжения источника питания. Предлагаемые методы отличаются простотой и относительно малым объемом вычислений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бажинов О.В., Смирнов О.П., Серіков С.А., Двадненко В.Я. Синергетичний автомобіль. Теорія і практика. – Харків: ХНАДУ, 2011. – 235 с.
2. Бажинов О.В., Смирнов О.П., Серіков С.А. та ін. Гібридні автомобілі. – Харків: ХНАДУ, 2008. – 327 с.
3. Деев С.Г., Потапенко Е.М. Энергетические и регулировочные характеристики многодвигательных электроприводов переменного тока // Вісник Кременчуцького державного університету. – Кременчук: КДУ, 2011. – Вип. 1/2011, ч. 1. – С. 136–137.
4. Потапенко Е.М., Потапенко Е.Е. Робастные алгоритмы векторного управления асинхронным приводом. – Запорожье: ЗНТУ, 2009. – 352 с.
5. Деев С.Г., Потапенко Е.М. Принципы формирования робастного управления синхронным электроприводом // Тематический выпуск «Проблемы автоматизованого електропривода. Теорія і практика». – К.: Техніка, 2011. – № 3. – С. 58–59.

MULTI-MOTOR ELECTRIC DRIVE WITH HYBRID

S. Deev

Zaporizhzhya National Technical University
ul. Zhukovskogo, 64, Zaporozhye, 69063, Ukraine. E-mail: sgd1968@mail.ru

Considered energy, regulation characteristics and method of forming multi-motor synchronous electric drive moment of a hybrid car. The principles of the construction of robust control systems electric drive using combined control methods with estimate and compensation uncertainty of external influences, mechanical and electrical parameters of the electric drive.

Key words: hybrid, multi-motor electric drive, the control algorithm, energy.

REFERENCES

1. Bazhinov O.V., Smirnov O.P., Serikov S.A., Dvadenko V.J. *The synergetic car. Theory i practice.* – Kharkov: KhNAHU, 2011. – 235 p. [in Ukrainian]
2. Bazhinov O.V., Smirnov O.P., Serikov S.A. and oth. *Hibrid car.* – Kharkiv: KhNAHU, 2008. – 327 p. [in Ukrainian]
3. Deev S.G., Potapenko E.M. Energy and adjusting performance multi-motor AC drives // *Bulletin of the Kremenchuk State University.* – Kremenchuk: KDU, 2011. – Iss. 1/2011, part 1. – PP. 136–137. [in Russian]
4. Potapenko E.M., Potapenko E.E. Robust algorithms of vector control induction motor drive. – Zaporozhye: ZNTU, 2009. – 352 p. [in Russian]
5. Deev S.G., Potapenko E.M. The principles of the formation of robust control synchronous electric // *Special Issue "The automatic electric drive problems. Theory and practice".* – K.: Technika, 2011. – № 3. – PP. 58–59. [in Russian]

Стаття надійшла 13.07.2012.

Рекомендовано до друку
к.т.н., доц. Кореньковою Т.В.