

ОЦЕНИВАНИЕ СИЛЫ СЦЕПЛЕНИЯ КОЛЕСА ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ: СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ НАБЛЮДАТЕЛЬ

А.А. Кузьменко

*Институт компьютерных технологий и информационной безопасности
Южного федерального университета
Россия, 347922, Таганрог, Чехова ул., 2
E-mail: aakuzmenko@sfedu.ru*

Ключевые слова: адаптивное управление, оценивание силы сцепления, проскальзывание колеса, синергетическая теория управления, наблюдатель.

Аннотация: Работа иллюстрирует применение синергетического наблюдателя для оценивания силы сцепления колеса электромобиля. Построенный динамический наблюдатель входит в структуру адаптивного закона управления проскальзыванием колеса электромобиля. Как наблюдатель, так и закон управления имеют достаточно простую структуру и ориентированы на использование физически доступных переменных тормозной системы.

1. Введение

В настоящее время в электромобилях широко внедряется система «мотор-колесо», но ее использование обуславливается усложнением подсистем управления электромобиля, требует учета характеристик колеса, сцепления колеса с поверхностью дороги и др. Одной из таких подсистем является антиблокировочная тормозная система (АБС), которая должна обеспечивать адаптивность по отношению к быстро изменяющимся свойствам дорожного полотна и характеристикам шины [1]. При разработке алгоритмов управления АБС используются различные подходы и методы современной теории управления, а особое распространение находят методы, базирующиеся на оценивании скольжения колеса, силы сцепления, коэффициента трения колеса посредством линейных (LQR, LQRC, фильтр Калмана, расширенный фильтр Калмана) и нелинейных (оценивание со скользящим режимом, нелинейные наблюдатели, нейросетевые наблюдатели) методов оценивания; нелинейные регуляторы (метод функций Ляпунова, методы робастного управления, нечеткое и нейросетевое управление) и др. [2-10]. Также все большее практическое применение находят законы управления, синтезированные методом аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) синергетической теории управления (СТУ) [11-15]. Данная работа иллюстрирует применение синергетического наблюдателя для оценивания силы сцепления колеса.

2. Постановка задачи

При вращении колеса в направлении продольной (горизонтальной) скорости v , сила сцепления (сопротивления) шины F_x создается трением между поверхностью шины

и покрытием дороги. Эта сила будет создавать момент, который порождает вращающее движение колеса, создавая угловую скорость ω . Тормозной момент, прилагаемый к колесу, будет действовать против вращения колеса, создавая отрицательное угловое ускорение. Уравнения движения тормозной системы колеса в режиме торможения имеют вид [8]

$$(1) \quad \begin{aligned} m\dot{v}(t) &= -F_x; \\ J\dot{\omega}(t) &= rF_x - T_b \text{sign}(\omega), \end{aligned}$$

где m – присоединенная масса тормозной системы колеса, $F_x = F_z \mu(\lambda, \mu_H, \alpha)$; $F_z = mg$ – вертикальная сила; μ – коэффициент трения, который является нелинейной функцией следующих аргументов: λ – продольное скольжение шины, μ_H – коэффициент сцепления между шиной и дорогой, α – угол скольжения колеса; T_b – тормозной момент (управление); r – радиус колеса; J – инерция колеса.

Продольное скольжение λ определяется выражением:

$$(2) \quad \lambda = (v - r\omega) / v.$$

Значение коэффициента $\lambda = 0$ соответствует свободному движению колеса, когда сила сцепления F_x не оказывает влияния. Если при скольжении достигается значение $\lambda = 1$, то колесо блокируется, что означает его остановку [8].

Существуют разные подходы для вычисления силы сцепления, так в [3,8] рассматриваются следующие соотношения:

$$(3) \quad \begin{aligned} F_x = F_z \mu(\lambda, \omega) &= F_z \text{sign}(\lambda) \left(\frac{\sigma_0}{L_0} g(\omega, \lambda, \theta) \frac{\lambda}{1-\lambda} \right) / \left(\frac{\sigma_0}{L_0} \frac{\lambda}{1-\lambda} + g(\omega, \lambda, \theta) \right); \\ g(\omega, \lambda, \theta) &= \theta \left(\mu_c + (\mu_s - \mu_c) e^{-|r\omega\lambda| / (|1-\lambda|v_s)} \right), \end{aligned}$$

где μ_c , μ_s – коэффициенты статического и кулоновского трения; v_s – штрибековская скорость; σ_0 – нормализованная продольная жесткость; L_0 – длина контактной поверхности шины; θ – параметр, характеризующий свойства поверхности.

Итак, целью управления системой (1) является торможение колеса при требуемом значении величины проскальзывания $\lambda = \lambda^0 = \text{const}$. При этом значение λ^0 является или константой, или определяется системой управления верхнего уровня, например, от системы курсовой устойчивости [3,8]. Таким образом, согласно (2) имеем формализованную цель – технологический инвариант в методе АКАР:

$$(4) \quad \lambda - \lambda^0 = v - r\omega - v\lambda^0 = 0.$$

Однако в модели (1) имеется неопределенность, обусловленная силой F_x . Для снятия этой неопределенности традиционно используется один из подходов: либо синтезируется робастное управление проскальзыванием колеса, например, на основе скользящего управления [6,7], либо осуществляется построение наблюдателя, осуществляющего оперативное оценивание силы сцепления [4,7,9,10].

3. Построение адаптивного закона управления и синергетического наблюдателя

Отличительной особенностью метода АКАР для синтеза нелинейных адаптивных законов управления с наблюдателем является то, что он позволяет осуществлять анали-

тический синтез законов управления по исходным нелинейным моделям объекта без применения процедур линеаризации, сепарирования каналов управления и без построения эталонной модели [11-15].

Для построения адаптивного закона управления объектом (1) с синергетическим наблюдателем силы сцепления F_x сформируем следующую модель синергетического синтеза:

$$(5) \quad \begin{aligned} \dot{v}(t) &= -z / m; \\ \dot{\omega}(t) &= -T_b / J + rz / J; \\ \dot{z}(t) &= 0, \end{aligned}$$

где z – динамическая переменная модели кусочно-постоянного возмущения F_x , действующего на систему (1).

Согласно методу АКАР при построении законов адаптивного управления с наблюдателями [11-15] первым этапом процедуры синтеза является построение закона управления, обеспечивающего требуемый технологический инвариант – в нашем случае (4). При этом предполагают, что возмущение F_x измеряемо.

Для расширенной модели (5) введем макропеременную

$$(6) \quad \psi = v - r\omega - v\lambda^0.$$

Следуя процедуре синтеза метода АКАР, из совместного решения (6), функционального уравнения $\dot{\psi}(t) + \beta\psi = 0$ и расширенной модели (5) находим выражение для управляющего воздействия:

$$(7) \quad T_b(v, \omega, z) = \left(J(1 - \lambda^0) / (rm) + r \right) z - J\beta(v - r\omega - v\lambda^0) / r.$$

Условиями устойчивости системы (4) с законом управления (7) является $\beta > 0$. В (7) присутствует ненаблюдаемая переменная z , для которой на следующем этапе процедуры синтеза необходимо построить динамический наблюдатель. Введем многообразие

$$(8) \quad \psi_n = z - \hat{z}.$$

где \hat{z} – оценка ненаблюдаемой переменной z (возмущения F_x).

Для построения наблюдателя вводится функциональное уравнение:

$$(9) \quad \dot{\psi}_n(t) + L\psi_n = 0,$$

где $L > 0$ – коэффициент, который определяет устойчивость уравнения (9) и задает динамику наблюдателя (скорость оценивания).

Оценку переменной состояния \hat{z} будем искать в форме:

$$(10) \quad \hat{z} = \Phi(\omega) + s,$$

где $\Phi(\omega)$ – неизвестная на данном этапе непрерывная и дифференцируемая по своему аргументу функция, s – динамическая переменная наблюдателя.

Тогда, следуя процедуре синтеза наблюдателя [13,14], с учетом (9) и (10) получаем уравнение динамического наблюдателя:

$$(11) \quad \dot{s}(t) = LT_b / r - L(JL\omega / r + s);$$

$$(12) \quad \hat{z} = JL\omega / r + s.$$

На последнем этапе процедуры синтеза закона адаптивного управления необходимо в выражении для закона (7) заменить переменную z ее оценкой (12).

Таким образом, имеем итоговый закон адаптивного управления с наблюдателем:

$$(13) \quad T_b(v, \omega, s) = \left(J(1 - \lambda^0) / (rm) + r \right) (JL\omega / r + s) - J\beta(v - r\omega - v\lambda^0) / r.$$

Проведем моделирование системы (1), в которой сила F_x задается выражением (3), с синтезированным динамическим наблюдателем (11) и адаптивным законом управления (13). Заданы следующие параметры объекта [3]: $\sigma_0 = 200$; $L_0 = 0,25$; $\mu_c = 0,5$; $\mu_s = 0,9$; $v_s = 12,5$; $r = 0,3$; $m = 200$; $J = 0,23$; а параметры регулятора $\lambda^0 = 0,1$; $\beta = 50$; $L = 100$. Результаты моделирования представлены на рис. 1-4. При моделировании полагалось, что коэффициент сцепления с поверхностью θ изменяется во времени согласно выражению

$$\theta(t) = \begin{cases} 0,7 & \text{при } t < 0,5; \\ 1,3 & \text{при } 0,5 \leq t < 1; \\ 0,2 & \text{при } t \geq 1. \end{cases}$$

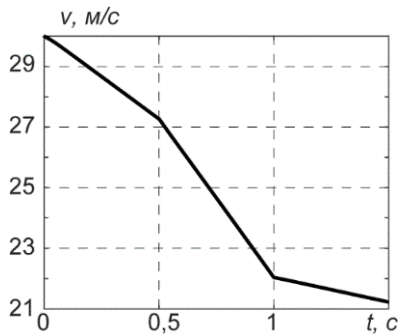


Рис. 1. График изменения линейной скорости.

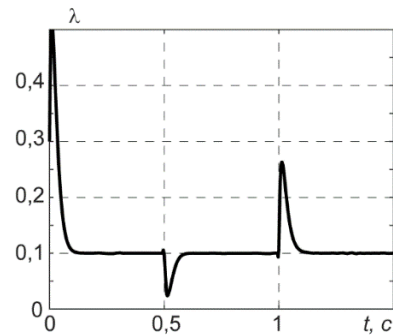


Рис. 2. График изменения скольжения.

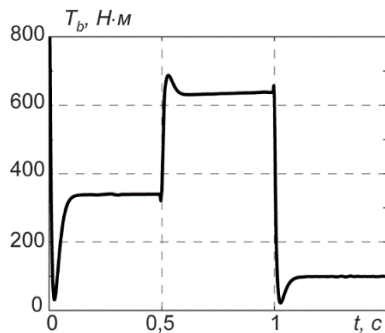


Рис. 3. График изменения управления.

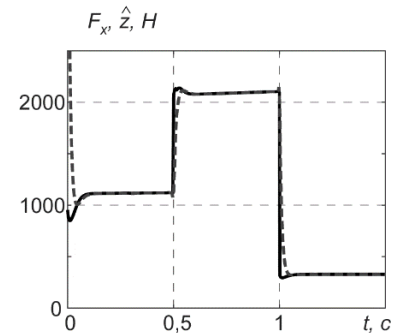


Рис. 4. График изменения силы сцепления (3) и ее оценки (12).

Из рис. 2 видно, что при различных значениях коэффициента сцепления с поверхностью θ технологический инвариант (4) выполняется. На рис. 4 график изменения силы F_x показан сплошной линией, а оценка этой силы (12) – пунктирной линией. Таким образом, результаты компьютерного моделирования синтезированного адаптивного закона управления АБС с наблюдателем силы сцепления свидетельствуют о его эффективности функционирования в условиях неопределенности действия внешней среды.

4. Заключение

В монографии [3] предложен адаптивный закон управления АБС, включающий в свою структуру функцию $F_x(F_z, v, \omega, \theta)$, определяемую согласно (3). При этом предпо-

лагается, что на основе этой функции можно с помощью нейросети вычислить текущие характеристики дорожного полотна. Такое предположение представляется практически малоэффективным, т.к. в реальных условиях характеристики дорожного полотна могут существенно изменяться, а в структуру функции (3), не вводится каких-либо дополнительных измеряемых физических величин, отражающих текущее состояние полотна. Разумеется, в специализированных идеальных условиях, когда о функции $F_x(F_z, v, \omega, \theta)$ и ее параметрах заранее многое известно и практически не требуется каких-либо текущих физических измерений, такой подход может оказаться вполне оправданным. Такого рода условия возникают, например, при проведении компьютерных экспериментов и т. п.

Синтезированный методом АКАР закон управления (13), обеспечивающий требуемые свойства АБС в условиях значительной неопределенности, существенно проще синтезированного в работе [3] адаптивного закона управления: действительно, по структуре закон управления (13) является линейными относительно переменных состояния системы (5). Для реализации закона (13) не требуется как сложной нейросети для вычисления параметрических и внешних возмущений, так и не требуется вводить функцию $F_x(F_z, v, \omega, \theta)$ и достаточно использовать физически доступные координаты тормозной системы. Полученные в данной работе результаты можно распространить на полноприводные электромобили и электромобили с двумя ведущими колесами.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (18-08-00924а).

Список литературы

1. Hamersma H.A., Els P.S. ABS performance evaluation taking braking, stability and steerability into account // *International Journal of Vehicle Systems Modelling and Testing*. 2017. Vol. 12, No. 3-4. P. 262-283.
2. Веселов Г.Е., Никифоров А.М. Синергетическое управление системой «колесо-двигатель» электро-мобиля // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2011. № 6 (119). С. 101-110.
3. Терехов В.А., Тюкин И.Ю. Адаптация в нелинейных динамических системах. М.: URSS, 2014. 384 с.
4. Cho W., Yoon J., Yim S. and et al. Estimation of Tire Forces for Application to Vehicle Stability Control // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2010. Vol. 59, No. 2. P. 638-649.
5. Choi S.B. Antilock Brake System With a Continuous Wheel Slip Control to Maximize the Braking Performance and the Ride Quality // *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2008. Vol. 16, No. 5. P. 996-1003.
6. Mitić D., Antić D., Perić S. and et al. Fuzzy sliding mode control for anti-lock braking systems // *Proceedings of 7th IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics*. 2012. P. 217-222.
7. Patel N., Edwards C., Spurgeon S. K. A sliding mode observer for tyre friction estimation during braking // *Proceedings of American Control Conference*. 2006. P. 5867-5872.
8. Petersen I., Johansen T., Kalkkuhl J., et al. Wheel slip control using gain-scheduled LQ-LPV/LMI analysis and experimental results // *Proceedings of the European Control Conference*. 2003. P. 880-885.
9. Rajamani R., Piyabongkarn D., Lew J. Y. and et al. Algorithms for real-time estimation on individual wheel tire-road friction coefficients // *Proceedings of the American Control Conference*. 2006. P. 4682-4687.
10. Zareian A., Azadi S., Kazemi R. Estimation of road friction coefficient using extended Kalman filter, recursive least square, and neural network // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics*. 2016. Vol. 230, No. 1. P. 52-68.
11. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. М.: Энергоатомиздат, 1994. 344с.
12. Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза / 2-е изд. М.: Либроком, 2012. 240 с.
13. Кузьменко А.А. Нелинейное адаптивное управление турбогенератором // *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2008. № 1. С. 112-119.
14. Кузьменко А.А. Нелинейные адаптивные законы управления турбиной судовой энергоустановки // *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2012. № 4. С. 38-51.

15. Кузьменко А.А., Сеницын А.С., Сеницына А.А. Адаптивное управление энергоустановкой «асинхронизированный генератор – ветротурбина» с нелинейным наблюдателем возмущения // Информатика и системы управления. 2016. № 4 (50). С. 103-114.