

Разработка системы энергосберегающего управления силовой установкой электромобиля с тяговым асинхронным двигателем

В.А. Адиняев, А.Н. Попов

Южный федеральный университет, Таганрог

Аннотация: В статье представлено решение задачи разработки системы векторного управления тяговым асинхронным двигателем электромобиля. При синтезе векторного регулятора используется нелинейная модель асинхронного двигателя и методы синергетической теории управления. Полученные алгоритмы управления обеспечивают минимизацию потерь энергии в процессе ее электромеханического преобразования и существенно увеличивают запас хода электромобиля без подзарядки батареи. Теоретические результаты подтверждены компьютерным моделированием силовой установки электромобиля, состоящей из аккумуляторной батареи, автономного инвертера напряжения, асинхронного двигателя и корпуса автомобиля. Для моделирования процессов в силовой установке использовалась среда динамического моделирования Simulink.

Ключевые слова: электромобиль, силовая установка, асинхронный двигатель, синергетический синтез регуляторов, энергосберегающее управление.

Введение

Прогресс в области разработки автономных источников электропитания и компактных силовых преобразователей обусловил очевидный тренд современного автомобилестроения – производство автомобилей на электрической тяге.

Ключевым элементом любого электромобиля является его силовая установка, состоящая из автономных источников и накопителей электроэнергии (аккумуляторов, топливных батарей, суперконденсаторов), силовых преобразователей (конверторов постоянного тока, инверторов) и электрических двигателей. Для обеспечения основных ходовых и энергетических требований, а также для координации работы всех силовых устройств тягового электропривода используется микропроцессорная система управления, которая на основании текущей информации и заданных параметров движения автомобиля формирует управляющие сигналы на силовые преобразователи [1, 2].

В данной статье представлено решение задачи разработки алгоритмов для системы полеориентированного (векторного) управления асинхронным двигателем (АД) тягового электропривода, обеспечивающих минимизацию электромагнитных потерь при изменении характеристик и условий движения электромобиля. Для синтеза регулятора используется метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) синергетической теории управления, предложенной профессором

А.А. Колесниковым и развиваемой научной школой кафедры синергетики и процессов управления Южного федерального университета [3-5].

Синтез энергосберегающего векторного регулятора АД

При синтезе алгоритмов управления рассматривается следующая нелинейная математическая модель АД в синхронной координатной системе, ориентированной по полю ротора:

$$\begin{aligned}\frac{d\omega}{dt} &= a_1 \psi_r i_{sq} - a_2 M_c; \\ \frac{d\psi_r}{dt} &= a_3 i_{sd} - a_4 \psi_r; \\ \frac{di_{sx}}{dt} &= -a_5 i_{sd} + a_4 a_6 \psi_r + a_7 \omega i_{sq} + a_3 \frac{i_{sq}^2}{\psi_r} + b_1 u_{sd}; \\ \frac{di_{sq}}{dt} &= -a_5 i_{sq} - a_6 a_7 \omega \psi_r - a_7 \omega i_{sd} - a_3 \frac{i_{sd} i_{sq}}{\psi_r} + b_1 u_{sq},\end{aligned}\tag{1}$$

где u_{sd} , u_{sq} – проекции вектора напряжения статора; i_{sd} , i_{sq} – проекции вектора тока статора; ψ_r – модуль вектора потокосцепления ротора, ω – угловая скорость ротора двигателя, M_c – момент, препятствующий движению двигателя, J – приведенный момент инерции, p – количество пар полюсов обмотки статора L_s, L_r, L_m – собственные и взаимная индуктивности обмоток, а r_s, r_r – активные сопротивления обмоток. Коэффициенты модели связаны с параметрами обмоток электрической машины следующим образом:

$$\begin{aligned}a_1 &= \frac{3pL_m}{2JL_r}, \quad a_2 = \frac{1}{J}, \quad a_3 = \frac{r_r L_m}{L_r}, \quad a_4 = \frac{r_r}{L_r}, \quad a_5 = \frac{r_r L_m^2 + r_s L_r^2}{L_r (L_s L_r - L_m^2)}, \\ a_6 &= \frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2}, \quad a_7 = p, \quad b_1 = \frac{L_r}{L_s L_r - L_m^2}.\end{aligned}$$

Момент M_c представляет собой сумму всех моментов, приложенных к валу двигателя и обусловленных действием внешних сил, которые возникают при движении электромобиля.

Ставится задача синтеза регулятора как задача определения аналитических функций $u_{sd} = u_{sd}(\omega, i_{sd}, i_{sq}, \psi_r)$ и $u_{sq} = u_{sq}(\omega, i_{sd}, i_{sq}, \psi_r)$, т.е. совокупности обратных связей замкнутой системы, обеспечивающих выполнение следующих задач управления:

- 1) стабилизации угловой скорости двигателя в заданном значении ω^* ;
- 2) минимизации потерь энергии в электромагнитной системе двигателя.

Значение ω^* может быть определено на основе заданного значения скорости электромобиля V^* из условия равновесия сил, приложенных к его центру масс [2].

Минимизация потерь энергии в АД достигается путем поддержания энергетических инвариантов [4, 6], устанавливающих оптимальное значение одной из электромагнитных переменных модели (1):

$$\begin{aligned} \psi_r^{opt} &= M_c^{0,5} \left(\frac{k_1}{k_2 + k_3 \omega^\beta} \right)^{0,25}, \\ i_{sd}^{opt} &= \frac{M_c^{0,5}}{L_m} \left(\frac{k_1}{k_2 + k_3 \omega^\beta} \right)^{0,25}, \quad i_{sq}^{opt} = \frac{2L_r M_c^{0,5}}{3pL_m} \left(\frac{k_2 + k_3 \omega^\beta}{k_1} \right)^{0,25}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $k_1 = \frac{4(r_s L_r^2 + r_r L_m^2)}{3p^2 L_m^2}$, $k_2 = \frac{3r_s}{L_m^2}$, $k_3 = \frac{\Delta P_{st.nom}}{314^\beta \psi_{r.nom}^2}$, $\Delta P_{st.nom}$ – мощность потерь в стали в номинальном режиме, $\beta \approx 1,2$.

Для поиска алгоритмов замкнутого управления в рамках процедуры синергетического синтеза вводятся следующие инвариантные многообразия:

$$\begin{aligned} \psi_1 &= i_{sd} - \frac{|M_c^*|^{0,5}}{L_m} \left(\frac{k_1}{k_2 + k_3 |\omega^*|^\beta} \right)^{0,25} = 0 \\ \psi_2 &= i_{sq} - \frac{a_2 |M_c^*|^{0,5}}{a_1} \left(\frac{k_2 + k_3 |\omega^*|^\beta}{k_1} \right)^{0,25} = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

которые соответствуют энергетическим инвариантам (2) и содержат значения скорости и момента в заданном режиме работы ω^* и M_c^* .

Для определения выражений для управляющих воздействий решается система функциональных уравнений метода АКАР $T_i \dot{\psi}_i + \psi_i = 0, i = 1, 2$ в силу уравнений модели (1). Полученный алгоритм векторного управления АД:

$$\begin{aligned} u_{sd} &= \frac{1}{b_1} \left(a_5 i_{sd} - a_4 a_6 \psi_r - a_7 \omega i_{sq} - a_3 i_{sq}^2 / \psi_r - \frac{1}{T_1} \left(i_{sd} - \lambda_1 |M_c^*|^{0,5} / L_m \right) \right), \\ u_{sq} &= \frac{1}{b_1} \left(a_5 i_{sq} + a_6 a_7 \omega \psi_r + a_7 \omega i_{sd} + a_3 i_{sd} i_{sq} / \psi_r - \frac{1}{T_2} \left(i_{sq} - a_2 \lambda_1^{-1} |M_c^*|^{0,5} / a_1 \right) \right). \end{aligned} \quad (4)$$

где $\lambda_1 = \left(k_1 / (k_2 + k_3 |\omega^*|^\beta) \right)^{0,25}$.

Моделирование силовой установкой электромобиля в Simulink

Для анализа процессов в силовой установке электромобиля с предлагаемыми алгоритмами векторного управления АД использовалась среда Simulink, интегрированная в пакет MATLAB для проведения динамического моделирования сложных технических систем

Модель силовой установки электромобиля, собранная в Simulink электромобиля, представлена на рис.1.

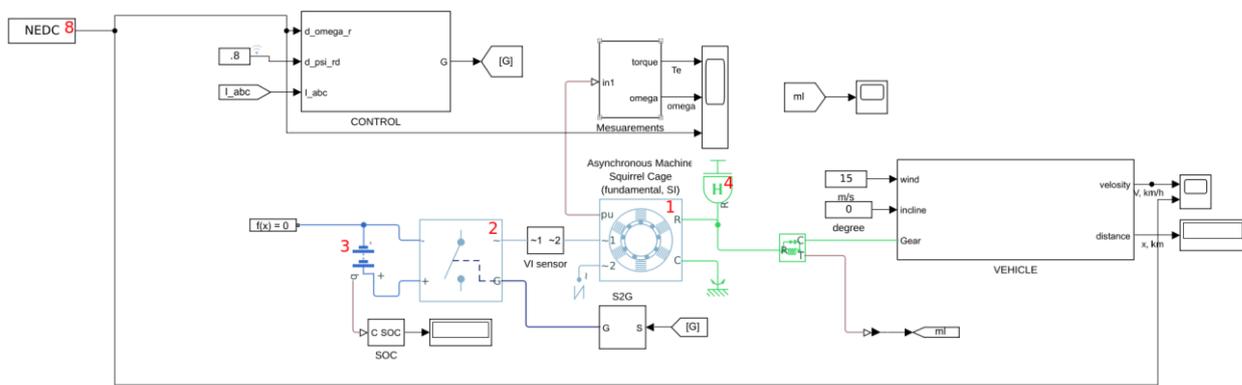


Рис. 1 – Модель силовой установки электромобиля в Simulink

На схеме введены следующие обозначения: 1 – блок «Induction Machine Squirrel Cage» (АД с короткозамкнутым ротором); 2 – «Converter (Three-Phase)» (автономный инвертер напряжения); 3 – «Battery» (аккумуляторная батарея, являющаяся основным источником электроэнергии); 4 – «Machine Inertia» (блок инерции ротора, моделирующий физические свойства ротора).

Корпус электромобиля и элементы трансмиссии реализованы в блоке «Vehicle», раскрытом на рис. 2.

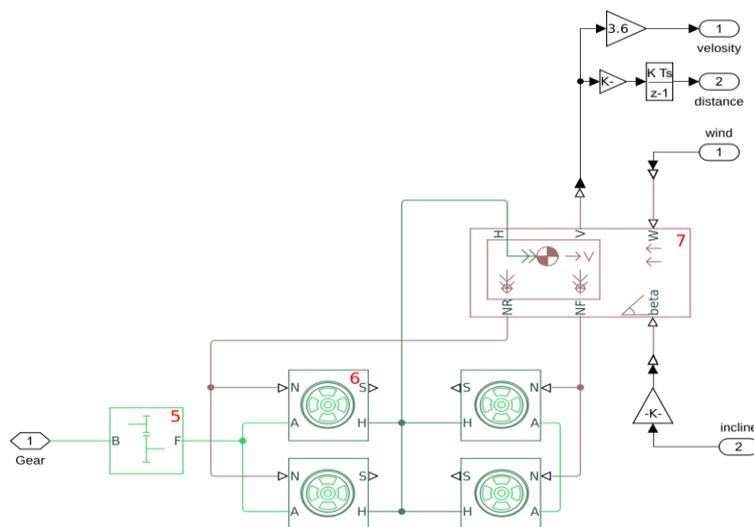


Рис. 2 – Модель корпус/колеса/трансмиссия в Simulink

Редуктор 5 «Simple gear» выполняет функцию изменения соотношения числа оборотов вала двигателя и колес электромобиля. Колесо 6 «Tire (Friction Parameterized)» моделирует силу трения скольжения возникающую в точке контакта колеса с поверхностью.

На рис. 3 представлена модель системы векторного управления. Центральное место занимает блок 10 – синтезированный энергосберегающий регулятор. На входе блока текущие значения переменных состояния, полученные в результате фазных и координатных преобразований (преобразования Парка-Горева и Кларк) [2, 7]. На выходе блока – два канала управляющих воздействий u_{sd} и u_{sq} , которые, проходя обратные преобразования, поступают на вход блока ШИМ. Выход блока ШИМ – шесть каналов управляющих импульсов различной скважности для управления силовыми ключами инвертора.

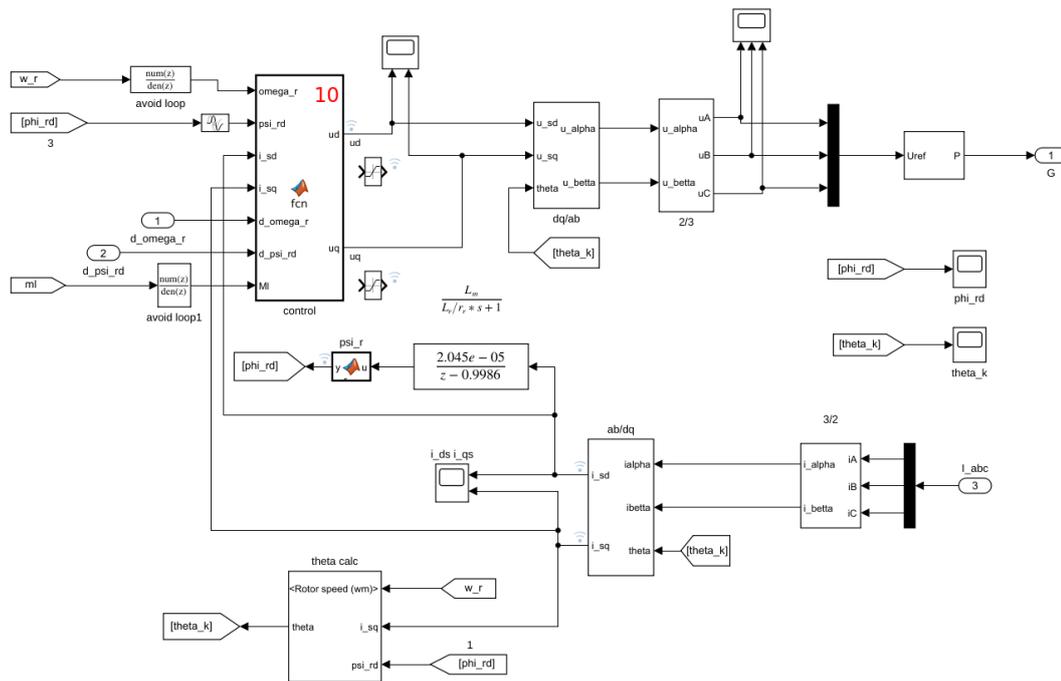


Рис. 3 – Модель системы векторного управления АД в Simulink

Описанная модель использовалась для моделирования движения электромобиля при различных стратегиях управления. Кроме синтезированного регулятора (4) рассматривалась традиционная система типа «Transvector» с ПИ-регуляторами в контурах управления, стабилизирующая потокосцепление ротора в номинальном значении [8-10].

На рис.4-5 представлены графики изменения скорости электромобиля во времени при различных стратегиях управления. Имитировался режим исполнения задания по скорости электромобиля в соответствии с циклом New european driving cycle (NEDC). Для каждого из алгоритмов управления проведен тест на ускорение от 0 до 100 (60) км/ч.

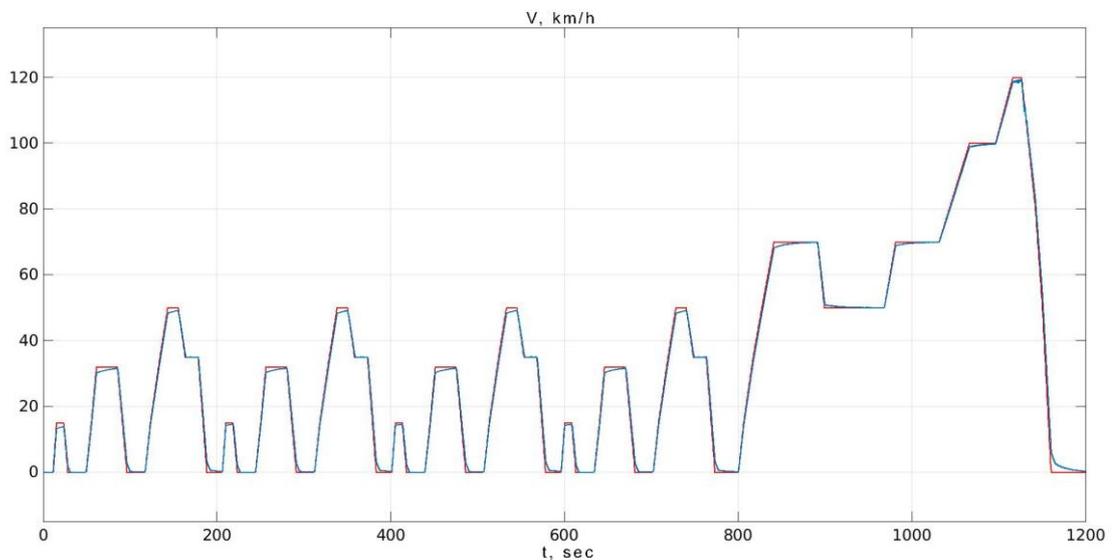


Рис. 4 – Угловая скорость ротора: традиционный регулятор

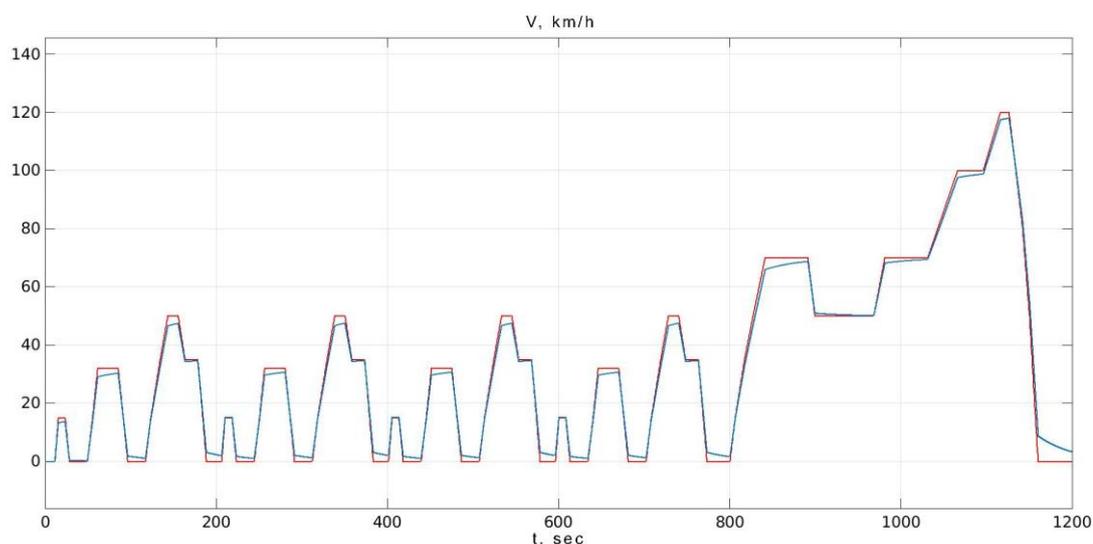


Рис. 5 – Угловая скорость ротора: энергосберегающий регулятор

Об энергоэффективности различных стратегий управления можно судить, исходя из анализа состояния батареи в ходе моделирования пробега электромобиля. Результаты этого анализа сведены в таблице 1. Расход заряда батареи при использовании энергосберегающего регулятора примерно на 40% ниже по сравнению с традиционными системами.

Таблица № 1

Сравнительная характеристика расхода заряда батареи и пробега для различных регуляторов

	Расход батареи, отн. ед.	Пробег, км
Традиционный регулятор стабилизации	1	8,125
Энергосберегающий регулятор	0,663	8,060

Заключение

Полученные результаты моделирования дают основание сказать, что разработанная система управления обеспечивает выполнение заданного режима движения электромобиля с оптимизацией потребления энергии аккумуляторной батареи. Таким образом, предложенные алгоритмы позволяют заметно увеличить запас хода без подзарядки батареи и могут найти широкое применение при проектировании

перспективных микропроцессорных систем управления силовыми установками электромобилей.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ по проекту №18-08-00924 «Разработка теоретических основ построения иерархических систем управления силовыми установками электромобилей».

Литература

1. Chau K.T. Electric vehicle machine and drives: design, analysis and application. «John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd». 2015. 400 p.
2. Kwang Hee Nam. AC Motor Control and Electrical Vehicle Applications. CRC Press. 2019. 556 p.
3. Колесников, А. А. Синергетическая теория управления. –М: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.
4. Колесников А.А., Веселов Г.Е., Попов А.Н. и др. Синергетические методы управления сложными системами: механические и электромеханические системы. – Изд. стереотип. URSS, 2019. – 300 с.
5. Олейников К.А. // Инженерный вестник Дона, 2019, № 9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2019/6204.
6. Попов А.Н. Энергосберегающие регуляторы для систем автоматизированного электропривода // Инженерный вестник Дона, 2016, № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3771.
7. Чиликин М.Г., Ключев В.И., Санлер А.С. Теория автоматизированного электропривода. М.: Энергия, 1979. – 616 с.
8. Blaschke F. The principle of field-orientation as applied to the transvector closed loop control system for rotating-field machines: Siemens Rev., vol. 34, № 1, pp. 217–220, 1972.
9. Рудаков В.В., Столяров И.М., Даргау В.А. Асинхронные электроприводы с векторным управлением. Л.: Энергоатомиздат, 1987. 136 с.
10. Анучин А.С. Системы управления электроприводов. Учебник для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – 373 с.

References

1. Chau K.T. Electric vehicle machine and drives: design, analysis and application. «John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd.». 2015. 400 p.
-



2. Kwang Hee Nam. AC Motor Control and Electrical Vehicle Applications. CRC Press. 2019. 556 p.
3. Kolesnikov, A. A. Sinergeticheskaya teoriya upravleniya [Synergetic control theory]. M: Energoatomizdat, 1994. 344 p.
4. Kolesnikov A.A., Veselov G.Ye., Popov A.N. i dr. Sinergeticheskiye metody upravleniya slozhnymi sistemami: mekhanicheskiye i elektromekhanicheskiye sistemy [Synergetic methods of control for complex systems: mechanical and electromechanical systems]. Izd. stereotip. URSS, 2019. 300 p.
5. Oleynikov K.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, № 9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2019/6204.
6. Popov A.N. Inzhenernyj vestnik Dona, 2016, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3771.
7. Chilikin M.G., Klyuchev V.I., Sanler A.S. Teoriya avtomatizirovannogo elektroprivoda [Theory of an automated electric drive]. M.: Energiya, 1979. 616 p.
8. Blaschke F. Siemens Rev., vol. 34, № 1, pp. 217–220, 1972.
9. Rudakov V.V., Stolyarov I.M., Dartau V.A. Asinkhronnyye elektroprivody s vektornym upravleniyem [Asynchronous electric drives with vector control]. L.: Energoatomizdat, 1987. 136 p.
10. Anuchin A.S. Sistemy upravleniya elektroprivodov. Uchebnik dlya vuzov [Control systems for electric drives. Textbook for universities]. M.: Izdatel'skiy dom MEI, 2015. 373 p.