

Синтез энергоэффективных регуляторов для систем векторного управления асинхронным двигателем силовой установки электромобиля

А. Н. Попов

Южный федеральный университет
anpopov@sfedu.ru

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы синтеза регуляторов для систем векторного управления асинхронным двигателем, работающим в составе силовой установки электромобиля. Представлена процедура синергетического синтеза алгоритмов векторного управления, обеспечивающих заданную скорость движения электромобиля при минимизации суммарных потерь в двигателе. Теоретические выводы подтверждаются компьютерным моделированием замкнутых систем. Проводится анализ энергетической эффективности силовой установки электромобиля с предложенными алгоритмами управления.

Ключевые слова: силовая установка электромобиля; системы векторного управления асинхронным двигателем; энергосберегающее управление; синергетический синтез регуляторов

I. ВВЕДЕНИЕ

Возрастающие энергетические и экологические вызовы заставляют автопроизводителей уделять все большее внимание вопросам разработки автомобилей с электрической или гибридной силовой установкой.

Ядро силовой установки любого электромобиля – тяговый электрический привод, преобразующий бортовую электроэнергию в движение транспортного средства. По сравнению с приводами промышленного применения приводы электромобилей должны удовлетворять следующим дополнительным требованиям [1]: высокий удельный момент и высокая удельная мощность; широкий диапазон регулирования скорости, включающий режимы «ползучей» скорости в пробах и высокоскоростное движение по автомагистралям; высокая эффективность в широком диапазоне изменения крутящего момента и скорости двигателя; высокий крутящий момент при разгоне и преодолении подъемов.

Обеспечение указанных требований осуществляется посредством соответствующей микропроцессорной системы управления, являющейся неотъемлемой и важнейшей частью тягового привода электромобиля. Это система на основании текущей ситуации и требуемых характеристик движения, в режиме реального времени

рассчитывает сигналы управления для электрических силовых преобразователей (инверторов и DC/DC конверторов), которые в свою очередь формируют необходимые напряжения на обмотках электродвигателя. В электромобилях в основном используются двигатели переменного тока – асинхронные с короткозамкнутым ротором и синхронные с постоянными магнитами. Поэтому задача системы управления сводится к выработке управляющих воздействий для автономного инвертора с ШИМ, который преобразует постоянное напряжение системы энергообеспечения (батареи, суперконденсатора, топливного элемента) в переменное напряжение заданной амплитуды и частоты, подаваемое на статорную обмотку двигателя.

Наибольшее распространение в практике проектирования систем управления асинхронным двигателем (АД), в том числе и тяговым, получил принцип векторного или полеориентированного управления (ПОУ), предложенный F. Blaschke [2] и реализованный фирмой Siemens в системе Transvector [3]–[4].

Классическая система ПОУ представляет собой двухканальную систему управления – канал управления потоком сцеплением и канал управления моментом (скоростью). Каждый канал реализует принцип подчиненного регулирования координат и содержит два контура с ПИ-регуляторами. Таким образом, структура системы управления является линейной и неизменной, а синтез сводится к выбору параметров ПИ-регуляторов.

Следует, однако, заметить, что каналы управления в системах ПОУ являются связанными, а их разделение и независимое рассмотрение не совсем корректно. В этой связи, в структуру систем ПОУ вводятся дополнительные блоки развязки каналов управления и разрабатываются различные методики расчета параметров ПИ-регуляторов, компенсирующих взаимовлияние каналов управления и естественную обратную связь по ЭДС двигателя [3], [4]. Естественно, это не может не сказываться на точности и эффективности системы управления и ограничивает область ее устойчивости.

В работах научной школы кафедры синергетики и процессов управления Южного федерального университета [5]–[8] предлагается отойти от типовой структуры системы ПОУ и синтезировать алгоритмы

векторного управления АД на основе исходной нелинейной модели. Такие алгоритмы будут естественным образом учитывать все указанные особенности АД как объекта управления. Кроме того, появляются дополнительные возможности в плане повышения эффективности процесса электромеханического преобразования энергии.

В данной статье рассмотрено решение задачи синергетического синтеза регуляторов для систем ПОУ АД в составе силовой установки электромобиля, которые обеспечивают минимизацию потерь энергии в различных режимах его движения.

II. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Для синтеза алгоритмов управления используется математическая модель, состоящая из модели АД в координатной системе x_u , вращающейся синхронно с магнитным полем и ориентированной по вектору потокосцепления обмотки ротора, и уравнения продольного движения электромобиля [9]:

$$\begin{aligned}\frac{d\omega}{dt} &= a_1\psi_r i_{sy} - a_2 c_1 F_t; \\ \frac{d\psi_r}{dt} &= a_3 i_{sx} - a_4 \psi_r; \\ \frac{di_{sx}}{dt} &= -a_5 i_{sx} + a_4 a_6 \psi_r + a_7 \omega i_{sy} + a_3 \frac{i_{sy}^2}{\psi_r} + b_1 u_{sx}; \\ \frac{di_{sy}}{dt} &= -a_5 i_{sy} - a_6 a_7 \omega \psi_r - a_7 \omega i_{sx} - a_3 \frac{i_{sx} i_{sy}}{\psi_r} + b_1 u_{sy}; \\ m \frac{dV}{dt} &= F_t - F_{aero} - F_{roll} - mg \sin \alpha.\end{aligned}\quad (1)$$

Здесь и далее: u_{sx} , u_{sy} и i_{sx} , i_{sy} – проекции напряжения и тока статора на оси системы координат; ψ_r – модуль вектора потокосцепления ротора, ω – угловая скорость ротора, J – приведенный к валу двигателя момент инерции, p – количество пар полюсов обмотки статора L_s, L_r, L_m – собственные и взаимная индуктивности обмоток, а r_s, r_r – их активные сопротивления, m – масса электромобиля, а V – его скорость, F_t – сила тяги, возникающее при сцеплении ведущих колес с дорогой и создаваемая электродвигателем, F_{aero} – аэродинамическая сила, F_{roll} – сила трения качения, g – ускорение свободного падения, α – угол наклона дороги, R_w – радиус колес, k_{red} – передаточное число редуктора. Коэффициенты модели (1) определены следующим образом:

$$\begin{aligned}a_1 &= 3pL_m/(2JL_r), \quad a_2 = 1/J, \quad a_3 = r_r L_m/L_r, \quad a_4 = r_r/L_r, \\ a_5 &= (r_r L_m^2 + r_s L_r^2)/(L_r(L_s L_r - L_m^2)), \quad a_6 = L_m/(L_s L_r - L_m^2), \\ a_7 &= p, \quad b_1 = L_r/(L_s L_r - L_m^2), \quad c_1 = R_w/k_{red}.\end{aligned}$$

Аэродинамическая сила вычисляется как $F_{aero} = 0,5\rho C_d A_F (V + V_{wind})^2$, где ρ – плотность воздуха, C_d – коэффициент аэродинамической силы, A_F – площадь лобового обтекания, V_{wind} – скорость ветра. Сила сопротивления качению обычно пропорционально нормальной силе и вычисляется как $F_{roll} = k_{roll} mg \cos \alpha$, где k_{roll} – коэффициент трения качения. Сила тяги F_t основана на трении, которое пропорционально скольжению между колесом и дорожным покрытием. Величина этой силы определяется произведением нормальной силы на функцию скольжения. В большинстве случаев эту функцию можно считать линейной, а силу тяги вычислять как $F_t = \mu_s s_x mg \cos \alpha$, где μ_s – коэффициент трения скольжения, $s_x = (R_w \omega / k_{red} - V)/(R_w \omega / k_{red})$ – относительное скольжение.

III. СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА

Задача синтеза регулятора для систем ПОУ АД электромобиля формулируется как задача нахождения функций, определяющих математическую связь между текущими значениями переменных состояний и текущими значениями управляющих воздействий, т.е. функций $u_{sx} = u_{sx}(\omega, i_{sx}, i_{sy}, \psi_r, V)$ и $u_{sy} = u_{sy}(\omega, i_{sx}, i_{sy}, \psi_r, V)$. Эти функции фактически определяют структуру векторного регулятора как совокупность обратных связей, обеспечивающих выполнение задач управления АД.

Стандартной задачей управления АД в составе тяговой установки является задача стабилизации скорости движения электромобиля: $V = V_{ref}$. В традиционных системах ПОУ второй задачей управления является задача стабилизации потокосцепления ротора в номинальном значении $\psi_r = \psi_{rnom}$. Однако поддержание номинального потока при малом значении крутящего момента приводит к существенному уменьшению КПД двигателя.

Исследованию вопросов повышения энергетической эффективности электромеханического преобразования в АД посвящено большое количество работ. В [3], [10] показано, что при выполнении определенных условий возможна минимизация уровня энергетических потерь в АД при изменении его скоростного режима и момента нагрузки на его валу. Эти условия, записанные в математической форме и представляющие собой некоторые соотношения, определенным образом связывающие переменные модели АД и характеризующие режим минимальных потерь энергии, в работах [5], [6], [11], [12] названы энергетическими инвариантами.

Энергетические инварианты устанавливают оптимальное с точки зрения минимума потерь энергии значение одной из электромагнитных переменных модели АД. В данной работе используется энергетический инвариант, определяющий оптимальное значение потокообразующей проекции тока статора:

$$i_{sx}^{opt} = \frac{M_{ref}^{0,5}}{L_m} \left(\frac{k_1}{k_2 + k_3 \omega_{ref}^\beta} \right)^{0,25}, \quad (2)$$

где $k_1 = 4(r_s L_r^2 + r_r L_m^2) / (3p^2 L_m^2)$, $k_2 = 3r_s / L_m^2$, $k_3 = \Delta P_{st.nom} / (314^\beta \psi_r^2 nom)$, $\Delta P_{st.nom}$ – номинальное значение потерь в стали, $\beta \approx 1,2$ – коэффициент, зависящий от марки стали. M_{ref} и ω_{ref} – значения момента и скорости АД в заданном установившемся режиме, вычисляемые на основе заданного значения скорости движения электромобиля V_{ref} из уравнений движения ротора двигателя и электромобиля:

$$\omega_{ref} = V_{ref} \left(1 - \frac{k_{aero} V_{ref}^2}{\mu_s mg \cos \alpha} - \frac{k_{roll}}{\mu_s} - \frac{\tan \alpha}{\mu_s} \right)^{-1} c_1^{-1},$$

$$M_{ref} = \mu_s mg \cos \alpha (c_1 \omega_{ref} - V_{ref}) / \omega_{ref}.$$

Общие вопросы синергетического синтеза алгоритмов векторного управления АД подробно изложены в [6]–[8]. Рассмотрим особенности процедуры синтеза векторного регулятора для ПОУ АД, обеспечивающего стабилизацию скорости движения электромобиля и минимизацию потерь энергии в двигателе.

На первом этапе синтеза вводятся инвариантные многообразия (ИМ):

$$\begin{aligned} \psi_1 &= i_{sx} - i_{sx}^{opt} = 0, \\ \psi_2 &= i_{sy} - \phi_1 = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

где i_{sx}^{opt} определяется выражением (2), а ϕ_1 – некоторая, пока неизвестная функция.

На пересечении ИМ (3) динамика декомпозированной системы описывается уравнениями:

$$\begin{aligned} \frac{d\omega}{dt} &= a_1 \psi_r \phi_1 - a_2 c_1 F_t; \\ \frac{d\psi_r}{dt} &= a_3 i_{sx}^{opt} - a_4 \psi_r; \\ m \frac{dV}{dt} &= F_t - F_{aero} - F_{roll} - mg \sin \alpha. \end{aligned} \quad (4)$$

В модели (4) функцию ϕ_1 можно рассматривать как «внутреннее» управление и продолжить процедуру синтеза, задав «внутреннее» ИМ, определяющее желаемую динамику скорости электромобиля:

$$\psi_3 = (F_t - F_{aero} - F_{roll} - mg \sin \alpha) / m - l_1 (V - V_{ref}) = 0.$$

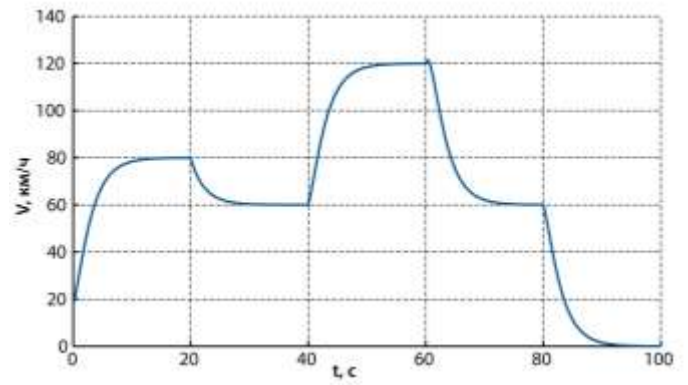


Рис. 1. Переходные процессы скорости электромобиля

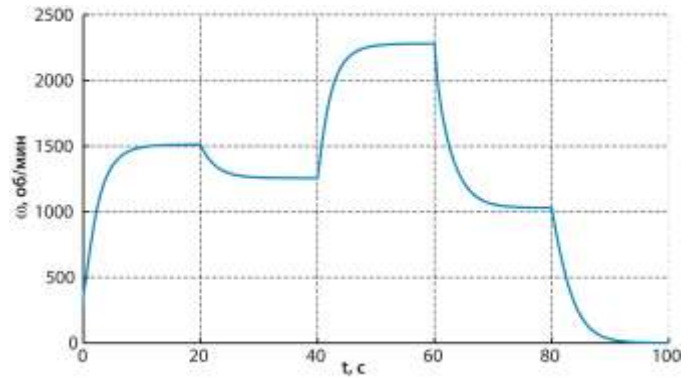


Рис. 2. Переходные процессы угловой скорости двигателя

На $\psi_3 = 0$ эта динамика описывается уравнением $dV/dt = l_1 (V - V_{ref})$, обладающим свойством асимптотической устойчивости относительно V_{ref} при $l_1 < 0$.

Функция ϕ_1 находится из решения функционального уравнения $T_3 d\psi_3/dt + \psi_3 = 0$ в силу модели (4). ИМ $\psi_2 = 0$ приобретает конкретный вид, а искомый закон управления ищется из решения системы уравнений $T_i d\psi_i/dt + \psi_i = 0, i = 1, 2$ в силу исходной модели (1).

IV. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для оценки эффективности синтезированного регулятора было проведено компьютерное моделирование замкнутой системы ПОУ АД. При моделировании использовались параметры и номинальные данные двигателя 4A250M4 и параметры электромобиля Nissan Leaf.

На рис. 1–4 представлены переходные процессы основных механических и электромагнитных переменных. Имитировался следующий режим движения электромобиля: разгон до скорости 80 км/ч по горизонтальной дороге; движение «в гору» под углом 15° со скоростью 60 км/ч; движение по горизонтальной дороге со скоростью 120 км/ч; движение «с горы» под углом -15° .

со скоростью 60 км/ч; торможение по горизонтальной дороге до полной остановки.

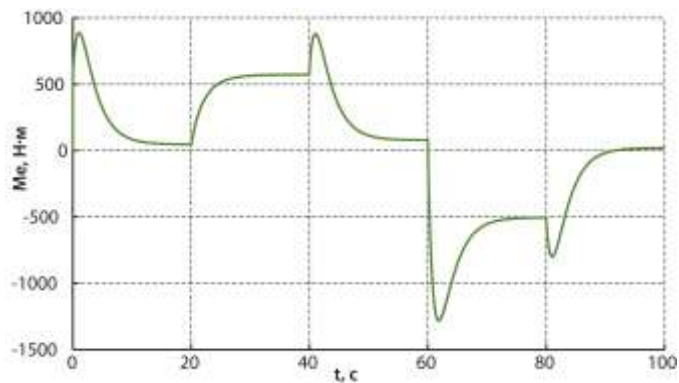


Рис. 3. Переходные процессы электромагнитного момента

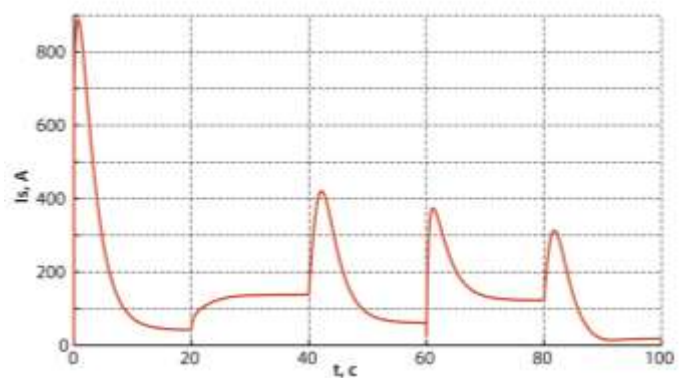


Рис. 4. Переходные процессы тока статора

В ходе моделирования была проведена оценка энергоэффективности предложенного алгоритма в сравнении с традиционной системой ПОО, обеспечивающей стабилизацию потокоцепления ротора в номинальном значении. На рис. 5 представлена диаграмма КПД АД в установившемся режиме на каждом из этапов моделируемого движения. Синие колонки соответствуют традиционному управлению, красные — энергосберегающему управлению.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценивая результаты проведенного компьютерного моделирования, можно сделать вывод, что предложенный алгоритм векторного управления АД, обеспечивает асимптотическую устойчивость замкнутой системы во всей допустимой области пространства состояний, а также позволяет существенно повысить энергетическую эффективность силовой установки электромобиля и, следовательно, увеличить запас хода на одной зарядке аккумуляторных батарей.

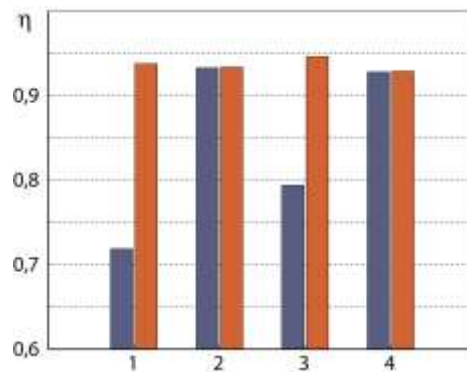


Рис. 5. Сравнительная диаграмма КПД двигателя

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Chau K.T. Electric vehicle machine and drives: design, analysis and application, 2015, John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd. 400 p.
- [2] Blaschke F. The principle of field-orientation as applied to the transvector closed loop control system for rotating-field machines: Siemens Rev., vol. 34, no. 1, pp. 217–220, 1972.
- [3] Чиликин М.Г., Ключев В.И., Санлер А.С. Теория автоматизированного электропривода. М.: Энергия, 1979. 616 с.
- [4] Рудаков В.В., Столяров И.М., Дартау В.А. Асинхронные электроприводы с векторным управлением. Л.: Энергоатомиздат, 1987. 136 с.
- [5] Современная прикладная теория управления. Ч. III. Новые классы регуляторов технических систем /Под редакцией А.А. Колесникова. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. 656 с.
- [6] Колесников А.А., Веселов Г.Е., Попов А.Н., Колесников Ал. А., Топчиев Б.В., Мушенко А.С., Кобзев В.А. Синергетические методы управления сложными системами: механические и электромеханические системы. Изд. стереотип. URSS, 2019. 300 с.
- [7] Колесников А.А., Веселов Г.Е. Синергетическое управление нелинейными электроприводами. III. Векторное управление асинхронными электроприводами // Известия вузов «Электромеханика». 2006. № 2. С. 25–36.
- [8] Веселов Г.Е., Попов А.Н., Радионов И.А. Синергетическое управление асинхронным тяговым электроприводом локомотивов // Известия РАН. Теория и системы управления. 2014. № 4. С. 166–180.
- [9] Kwang Hee Nam. AC Motor Control and Electrical Vehicle Applications. CRC Press. 2019. 556 p.
- [10] Энергосберегающая технология электроснабжения народного хозяйства: Практ. Пособие / Под ред. В.А. Веникова. Кн. 2. Энергосбережение в электроприводе / Ильинский Н.Ф., Рожанковский Ю.В., Горнов А.О. М.: Высш. Школа, 1989. 127 с.
- [11] Колесников А.А., Веселов Г.Е., Попов А.Н. Инварианты электромеханических систем и вибромеханики // Синергетика и проблемы теории управления: Сб. науч. тр. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. С. 251–269.
- [12] Попов А.Н. Синергетический синтез законов энергосберегающего управления электромеханическими системами. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2003. 67 с.