

Синергетический синтез системы управления силовой установкой электромобиля

Константин А. Олейников

*Институт компьютерных технологий и информационной безопасности
Южный Федеральный Университет*

koleynikov@sfsu.ru

Аннотация. В докладе рассматривается процедура синтеза регулятора силовой установки с электродвигателем синергетическими методами управления с учетом нелинейной динамики объекта управления для обеспечения заданных параметров и устойчивости в различных режимах движения.

Ключевые слова: электромобиль, силовая установка, электродвигатель, движение автомобиля, синергетическая теория управления, АКАР

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время во всём мире ведутся активные исследования, направленные на повышение эксплуатационных качеств современных автомобилей в составе которых присутствует электродвигатель – электромобили, а также развитие систем управления, обеспечивающих комфортное и длительное вождение на одном заряде. Применение качественных алгоритмов управления обеспечивает большую устойчивость и безопасность движения, а также повышает качество управления силовой установкой (скорость, разгон, плавность хода) в динамических процессах движения и сложных режимах и стабилизацию движения транспортного средства, особенно в экстремальных условиях при сильных возмущениях, при резких поворотах и на сложных типах поверхности типа дождя, льда, снега, движение в гору и прочих, дающих сложную нелинейную нагрузку и возмущения различного рода на электромобиль и силовую установку. С решением подобных трудностей с трудом справляется классическая теория управления, которой несвойственна работа с нелинейными моделями, вводя множественных допущения и упрощения, поэтому все большее развитие получают новые законы и алгоритмы управления, одной из которых является синергетическая теория управления.

Использование синергетического подхода при синтезе систем управления является достаточно новым и перспективным научным направлением, при которых используется нелинейная математическая модель объекта управления без упрощений и линеаризации, при котором получаются асимптотически устойчивые регуляторы, гарантирующие выполнение управленческих задач, таких как стабилизация величины, слежение, минимизации характеристики (например, энергопотребления) за счет использования в процессе синтеза специальных целевых функций – инвариантов [1]–[4].

II. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕМ

Система силовой установки электромобиля включает в себя: электродвигатель, аккумулятор, преобразователи энергии, шину постоянного тока, инвертор, а также различные датчики, отслеживающие работоспособность и функционал электромобиля.

Электродвигатель подбирается с учетом динамических характеристик электромобиля, главным образом это обеспечение требуемого крутящего момента на валу двигателя, количество оборотов, энергопотребление. Преимущественно в электромобилях используются двигатели переменного тока как синхронные с постоянными магнитами и асинхронными с короткозамкнутым ротором. Достижение же требуемых динамических характеристик достигается путем использования векторных систем управления, обеспечивающие высокую точность управления скоростью и моментом двигателя даже на низких скоростях.

Однако высокое качество регулирования требует качественных алгоритмов управления и обусловлено сложностью настройки регуляторов. В стандартной системе векторного регулирования, ориентированного по полю на примере Siemens Transvector, основная проблема возникает в настройке двух ПИ регуляторов с перекрестной связью и компенсации этих связей [5]. Подобных трудностей не имеет синергетическая теория управления, которая исключает упрощение модели объекта и использует нелинейную модель как исходную, а также решающую одну из основных проблем классической теории управления – высокой размерности объекта с несколькими каналами управления, позволяя задавать инварианты равные количеству каналов управления, обеспечивая выполнение разных технологических задач управления.

Помимо сложных моделей и способов настройки управления электроприводом переменного тока существенными нелинейностями обладает и движение колесного транспорта по дорожному покрытию. Для того чтобы лучше понять процессы, рассмотрим математическую модель движения и динамику сил, действующих на электромобиль по прямолинейной дороге.

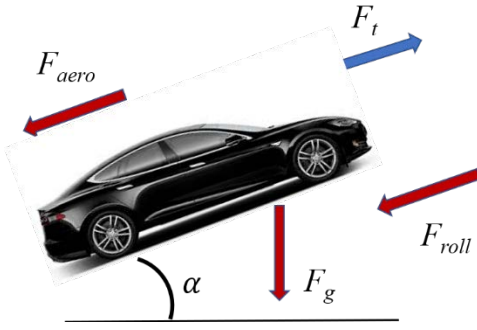


Рис. 1. Силы, действующие на электромобиль

Как показано на рис. 1 электромобиль начинает движение под действием следующих сил: силами сопротивления F_{aero} – аэродинамическая сила, F_{roll} – сила сопротивления качению F_g – сила тяжести и тяговыми силами F_t – сила тяги.

Согласно 2-му закону Ньютона, уравнение для продольной динамики автомобиля может быть представлено в виде:

$$F_x = F_t - F_{aero} - F_{roll} - F_g \quad (1)$$

Выражения для сил могут быть получены согласно [6], [7]:

$$F_{aero} = 0.5\rho C_d A_F (V_x + V_{wind})^2, \quad (2)$$

где ρ – плотность воздуха, C_d – аэродинамический коэффициент лобового сопротивления, V_x – скорость движения автомобиля, V_{wind} – скорость ветра, A_F – фронтальная область автомобиля.

Сила сопротивления качению F_{roll} описывает процессы деформации и восстановления шины с дорожным полотном в точке соприкосновения:

$$F_{roll} = k_r mg \cos(\alpha), \quad (3)$$

Как отмечалось ранее, главной движущей силой является сила тяги F_t , возникающая в результате работы двигателя и взаимодействия колес с поверхностью дороги.

Эта сила зависит не только от параметров самого электромобиля, но также максимальный вектор тяги ограничен силой сцепления колеса с дорогой F_{sc} . Сила сцепления F_{sc} – это сила, которая препятствует скольжению колеса. Она зависит не только от скорости автомобиля V , но и от скорости скольжения колес V_{sk} относительно дорожного покрытия.

$$F_t = \mu_k \lambda m_0 g \cos \alpha, \quad (4)$$

Сцепление характеризуется значением коэффициента сцепления μ_k , который равен значению из Таблицы I в зависимости от типа и состояния дорожного покрытия. В условиях, когда тяга превышает максимальное значение μ_k происходят буксование колес – сильное проскальзывание колес относительно дороги. Проскальзывание λ может быть выражено как [8]:

$$\lambda = \frac{V_{sk}}{\omega_k \cdot r_k}, \quad (5)$$

где $V_{sk} = \omega_k \cdot r_k - V$ – скорость движения колес относительно поверхности дороги, $\omega_k = \omega_r \cdot n$, n – передаточное число редуктора от двигателя к колесам. Зависимость коэффициента сцепления μ_k от проскальзывания колеса λ мы рассматриваем как кусочно-непрерывную функцию, удовлетворяющую следующим условиям:

$$k_\psi = \begin{cases} 0,5\lambda & 0 \leq \lambda \leq 2; \\ (1 - 0,002041(\lambda-2)) & \text{если } \lambda > 2. \end{cases} \quad (6)$$

Номинальные значения коэффициента сцепления μ_k могут быть определены из табл. I.

ТАБЛИЦА I. ЗНАЧЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ СЦЕПЛЕНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТИПА ПОКРЫТИЯ

Тип дорожного покрытия	Коэффициент сцепления μ_k
Мокрый лед	0.1
Сухой лед / снег	0.2
Свободный песок	0.3 - 0.4
Сухая глина	0.5 - 0.6
Мокрый прокат Гравий	0.3 - 0.5
Сухой рулонный гравий	0.6 - 0.7
Мокрый асфальт	0.6
Мокрый бетон	0.6
Сухой асфальт	0.9
Сухой бетон	0.9

Тяговый момент может быть тогда выражен с использованием следующего выражения:

$$M_{sc} = r_k G_k \mu_k k_\psi, \quad (7)$$

Основной задачей контроля тяги двигателя является поддержание проскальзывания λ в желаемом диапазоне (от 0 до 2), что обеспечивает максимальное сцепление электромобиля с дорогой.

Система дифференциальных уравнений асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с учетом динамики транспортного средства (1) и принимая во внимание все изменения из уравнений (2) – (7), итоговая система может быть представлена следующим образом [9]:

$$\begin{aligned} \frac{di_{sx}}{dt} &= \frac{L_m r_r \psi_r - (r_r L_m^2 + r_s L_r^2) i_{sx} + L_r^2 u_{sx}}{L_r L} + \omega_r i_{sy} + \frac{r_r L_m i_{sy}^2}{L_r \psi_r}; \\ \frac{di_{sy}}{dt} &= -\frac{L_m r_r \omega_r \psi_r - (r_r L_m^2 + r_s L_r^2) i_{sy} + L_r^2 u_{sy}}{L_r L} - \omega_r i_{sx} - \\ &\quad - \frac{r_r L_m i_{sx} i_{sy}}{L_r \psi_r}; \\ \frac{d\psi_r}{dt} &= \frac{r_r L_m i_{sx}}{L_r} - \frac{r_r}{L_r} \psi_r; \\ \frac{d\omega_r}{dt} &= \frac{p m L_m \psi_r i_{sy}}{2 L_r J} - \frac{M_{sc}}{J}; \\ \frac{dV}{dt} &= \frac{m_0 g \mu_k k_\psi - k_r \cdot m_0 g - 0.5 \rho C_d A_F (V + V_{wind})^2}{m_0}, \end{aligned} \quad (8)$$

где i_{sx} и i_{sy} – проекции тока статора на оси X и Y соответственно, u_{sx} и u_{sy} – проекции напряжений статора на оси X и Y , L_r и L_s – индуктивности ротора

и статора, L_m – взаимная индуктивность, p – число пар полюсов, m – число фаз, M_c – момент сопротивления на валу двигателя, J – момент инерции двигателя, ψ_r – потокосцепление ротора, ω_r – частота вращения ротора, r_r и r_s – сопротивления ротора и статора. M_c представляет собой сумму всех моментов, приложенных к валу двигателя и обусловленных действием внешних сил, возникающих при движении электромобиля.

III. ПРОЦЕДУРА СИНТЕЗА СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА

В системе (8) каналами управления являются проекции напряжения статора u_{sx} и u_{sy} . Основными задачами построения регулятора являются стабилизация значений потокосцепления ротора ψ_r ($\psi_r = \psi_r^0$) и частоты вращения ротора двигателя ω_r ($\omega_r = \omega_r^0$), где ω_r^0 и ψ_r^0 – желаемые значения, а также задача контроля тяги двигателя поддерживая значения проскальзывания λ в нужном диапазоне и стабилизации скорости движения электромобиля V .

В соответствии с процедурой метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) теории синергетического управления необходимо определить первую пару макропеременных [10]:

$$\psi_1 = i_{sx} - \varphi_1; \quad \psi_2 = i_{sy} - \varphi_2, \quad (9)$$

где φ_1 и φ_2 – относительные функции, которые аналогичны требуемым значениям проекций тока статора в традиционных системах полеориентированного управления i_{sx}^* и i_{sy}^* и которые должны удовлетворять основным функциональным уравнениям (ОФУ):

$$T_1 \frac{d\psi_1}{dt} + \psi_1 = 0; \quad T_2 \frac{d\psi_2}{dt} + \psi_2 = 0. \quad (10)$$

Функции φ_1 и φ_2 могут рассматриваться как «внутренние» управления и являются продолжением процедуры синтеза, устанавливая «внутренние» инвариантные многообразия, которые определяют желаемые значения скорости вращения ротора и потокосцепления, декомпозируя систему. Если задача состоит в том, чтобы стабилизировать эти переменные в определенном значении, то эти инвариантные многообразия имеют простой и очевидный вид [10]:

$$\begin{aligned} \psi_3 &= \omega_r - \omega_r^* = 0, \\ \psi_4 &= \psi_r - \psi_r^* = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

В базовом АКАР задачи при управлении асинхронным двигателем состоят в том, чтобы стабилизировать потокосцепление и частоту вращения ротора в желаемых значениях (11). Однако в задаче управления двигателем в составе электромобиля нужны такие задачи, как поддержание скорости движения транспортного средства на участке дороги. И тогда выберем следующее инвариантное многообразие по стабилизации скорости движения электромобиля:

$$\psi_3 = \frac{F_t}{m} - k_1(V_x - V_x^*) = 0, \quad (12)$$

IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ

Для синтеза регулятора использовался пакет символьной математики Maple. Для моделирования и получения графиков переходных процессов использовался Matlab 2023.

Для эксперимента и отработки регулятора был выбран следующий режим движения электромобиля:

При $0 < t < 15$ движение по прямой ($\alpha = 0$);

При $15 < t < 25$ движение в уклон ($\alpha = +15^\circ$);

При $25 < t < 35$ движение по прямой ($\alpha = 0$);

При $35 < t < 45$ движение с уклона ($\alpha = -15^\circ$);

При $45 < t < 50$ движение по прямой ($\alpha = 0$);

В процессе движения также менялся тип поверхности движения с сухого асфальта на гравий на всем промежутке движения электромобиля $\mu_{s0} = 0.6 - 0.9$, $k_r = 0.05 - 0.09$. Момент нагрузки M_c изменялся в различных диапазонах от 0 до 100 на участке движения.

Основной задачей является стабилизация скорости движения на уровне $V_x = 60$ км/ч с последующим ее удержанием на всем промежутке движения электромобиля.

Результаты работы регулирования и переходные процессы показаны на рис. 2, которые показывают достижение необходимой цели по скорости движения электромобиля.

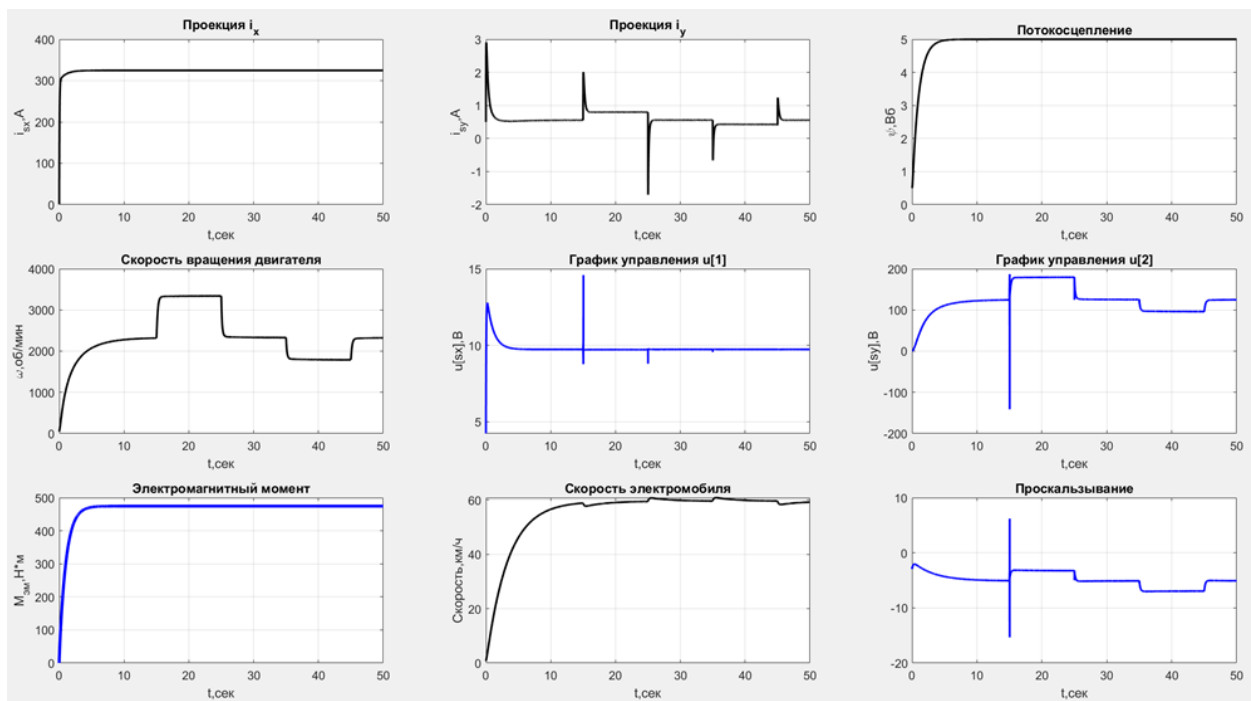


Рис. 2. Графики переходных процессов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье была рассмотрена система управления силовой установкой электромобиля с использованием синергетических методов. Рассмотрена математическая модель движения транспортного средства, асинхронного электропривода в составе силовой установки, определены основные зависимости. По выбранной модели осуществлен синтез методом АКАР синергетического регулятора, обеспечивающего выполнение основной технологической задачи – поддержание заданной скорости движения транспортного средства. Полученные результаты показали выполнение поставленной технологической задачи и перспективы построения сложных иерархических систем управления автомобилем на основе данного метода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Колесников А.А. Синергетическая теория управления. М.: Энергоатомиздат, 1994. 344 с.
- [2] Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза. 2-е изд. М.: Либроком, 2012. 240 с.
- [3] Современная прикладная теория управления: Синергетический подход в теории управления. Таганрог: Изд-во ТРТУ. Ч. II. 2000. 559 с.
- [4] Современная прикладная теория управления: Новые классы регуляторов технических систем. Таганрог: Изд-во ТРТУ. Ч. III. 2000. 656 с.
- [5] F. Blaschke, "The principle of field-orientation as applied to the transvector closed loop control system for rotating-field machines: Siemens Rev, 1972, vol. 34, no. 1, pp. 217–220.
- [6] Jazar R.N. Vehicle dynamics: Theory and Applications. Springer. 2008.
- [7] Смирнов, Г. А. Теория движения колесных машин: Учебн. для студентов машиностроит. спец. вузов. М.: Машиностроение, 1990. 352 с.
- [8] Kwang Hee Nam. AC Motor Control and Electrical Vehicle Applications. CRC Press. 2019.
- [9] Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. М.: Высшая школа, 1994. 327 с.
- [10] Олейников К.А. Синергетическая система стабилизации курсового движения автомобиля. Всероссийская научная конференция по проблемам управления в технических системах. 2023. Т.1. С. 65-68.