

Синтез векторной системы управления двигателем электромобиля с прямым регулированием момента

К.А. Олейников

*Институт компьютерных технологий и информационной безопасности Южного
Федерального Университета, г. Таганрог.*

Аннотация: Статья посвящена задаче управления асинхронным двигателем электромобиля в режиме разгона и поддержания скорости движения транспорта в желаемом значении с динамически меняющимся крутящим моментом. Для решения поставленной задачи описывалась динамика движения электромобиля, была описана система векторного управления с прямым регулированием момента с коммутацией ключей инвертора, обеспечивающего быстрое изменение электромагнитного момента практически без изменения скорости вращения ротора двигателя. На основе приведенной модели проведен синтез системы в пакете Matlab/Simulink, получены результаты моделирования. Синтезированные стратегии управления обеспечивают достижение поставленной задачи по разгону и стабилизации скорости движения электромобиля с учетом паспортных характеристик электромобиля, устойчивость замкнутой системы.

Ключевые слова: электромобиль, системы управления, динамика автомобиля, векторное управление, прямое управление моментом.

Введение

На сегодняшний день все большее развитие уделяется созданию транспорта на электрической тяге – электромобилей и систем управления двигателями переменного тока на их основе, которые уже на сегодня по дальности хода и динамическим характеристикам могут конкурировать с представителями на ископаемом топливе. Актуальность развития и совершенствования подобных систем обусловлена современными требованиями в области повышения эксплуатационных и динамических характеристик электромобиля, а также повышением общего уровня автоматизации транспортного средства и совершенствованием методов регулирования автоматизированной системы управления сложными объектами.

Анализ динамики движения электромобиля

Поскольку электромобиль/автомобиль является сложным объектом, то была рассмотрена только его продольная динамика движения вдоль прямой линии. Динамика сил, действующих на электромобиль, может быть расписана, как на рис.1 [1, 2].

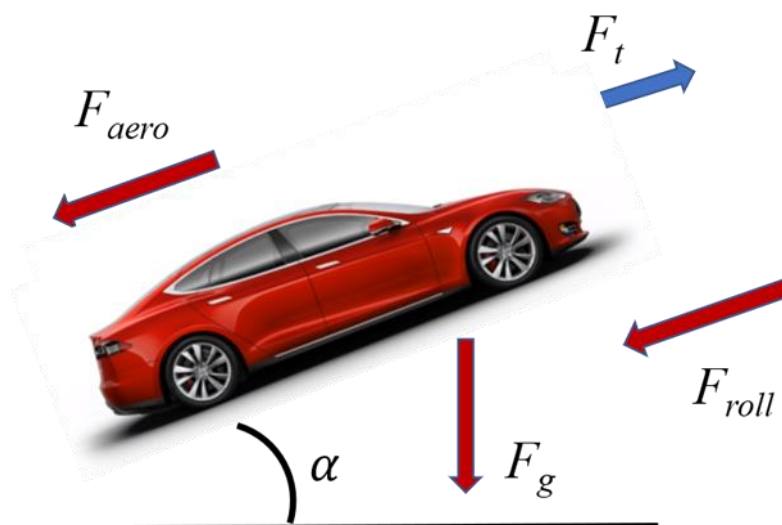


Рис. 1. – Динамика сил, действующих на электромобиль

Электромобиль приводится в движение под действием 4-х сил: F_t – главная движущая сила, сила тяги двигателя электромобиля, формирующая движение электромобиля в нужном направлении, F_{aero} – аэродинамическая сила, F_{roll} – сила сопротивления качению, F_g – гравитационная сила.

Общее уравнение движения электромобиля может быть определено по 2-му закону Ньютона для движущегося объекта с ускорением:

$$m \frac{dV_x}{dt} = F_t - F_{aero} - F_{roll} - F_g, \quad (1)$$

где V_x – скорость электромобиля в продольном направлении в м/с, m – масса электромобиля в кг.

Колесо преобразует крутящий момент M , получаемый от двигателя в силу тяги F_t благодаря трению, создаваемым трением шины с дорогой.

$$F_x = \frac{M}{r_k} \cdot n, \quad (2)$$

где M_k – крутящий момент двигателя, r_k – радиус колеса, n – передаточное число редуктора от двигателя к колесам..

Сила сопротивления качению F_{roll} обычно пропорциональна нормальной силе и рассчитывается как:

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

где k_{roll} – коэффициент трения качения, α – угол между горизонтальной прямой и линией, вдоль которой электромобиль движется.

Гравитационная сила может быть расписана как сила взаимодействия, движущегося под углом объекта с гравитационным полем Земли:

$$F_g = mg \sin(\alpha), \quad (4)$$

Аэродинамическая сила, как препятствующая движению сила, может быть определена, как:

$$F_{aero} = 0,5\rho C_d A_F (V_x + V_{wind})^2, \quad (5)$$

где C_d – коэффициент аэродинамической силы, ρ – плотность воздуха, V_{wind} – скорость ветра, A_F – площадь лобового обтекания электромобиля.

где g – ускорение свободного падения. Если на дороге подъемы и спуски дороги отсутствуют, то есть автомобиль движется по прямой, то данная сила равна нулю.

За основу моделирования были взяты параметры электромобиля Tesla Model S P85, работающей на асинхронном двигателе с короткозамкнутым ротором. Данные представлены в таблице 1 [3].

Таблица № 1

Параметры электромобиля

Наименование параметра	Значение параметра
Масса	2108 кг
Мощность двигателя	460 л.с./343 кВт, 8600 об/мин
Тип двигателя	Трехфазный асинхронный с короткозамкнутым ротором
Разгон до 100 км/ч	4.2 с
Максимальный крутящий момент	600 Н*м
Номинальное напряжение батареи	346 В
Коэффициент аэродинамического сопротивления C_d	0.24
Площадь лобового сопротивления A_F	2.3 м ²
Передаточное число редуктора n	9.73

Прямое управление моментом

Сердцем любого электромобиля является его электродвигатель, приходящий в движение транспортное средство. Структура системы управления двигателем электромобиля представлена на рис.4. Задающим воздействием является желаемая скорость движения электромобиля, определяемая степенью нажатия на педаль акселератора/тормоза, формирующая необходимый крутящий момент двигателя и скорость вращения ротора, который с учетом динамики самого электромобиля и вращения колеса и задает требуемую скорость движения. Управляющим воздействием является напряжение на трехфазных обмотках электродвигателя, формируемое управляемым инвертором с преобразователя аккумуляторной батареи.



Рис. 2 – Система управления электромобилем

Наибольшую эффективность показывают векторные методы управления двигателями переменного тока, позволяющие регулировать двигатель как по частоте вращения, так и по току, что в условиях быстро меняющегося крутящего момента и энергосбережения электродвигателя является критичной задачей [4].

Одним из векторных методов является метод прямого управления моментом (ПУМ), который впервые был предложен как развитие векторного управления в работах японских ученых И. Такахаши и Т. Ногучи [5]. По сравнению с векторным переориентированным управление метод прямого управления имеет ряд явных преимуществ, а именно:

- Высокие динамические характеристики системы управления, не требующей сложных координатных преобразований;
- Независимость от параметров двигателя кроме сопротивления статорной обмотки;

– Отсутствие необходимости использования датчиков скорости, положения ротора или блоков математических наблюдателей на их основе;

– Не требуются регуляторы тока, что упрощает синтез системы управления;

Однако вместе с этим характерны и явные недостатки метода ПУМ:

– Наличие гистерезисных регуляторов вызывают высокие пульсации при регулировании момента;

– Необходимость высокой частоты коммутаций ключей инвертора;

– Низкие динамические характеристики при низкой скорости вращения двигателя.

Частично проблема высоких пульсаций на старте решается путем замены гистерезисных регуляторов на нечеткие или с использованием искусственных сетей для управления шириной и амплитудой широтно-импульсной модуляции (ШИМ) [6, 7]. Другие методы могут быть построены на использовании нелинейных поверхностей и энергосберегающих решений на основе синергетического подхода [8].

В основе ПУМ лежит векторное преобразование с трехфазной системы координат в двухфазную систему Декартову систему координат по α и β на рис.3 [9]:

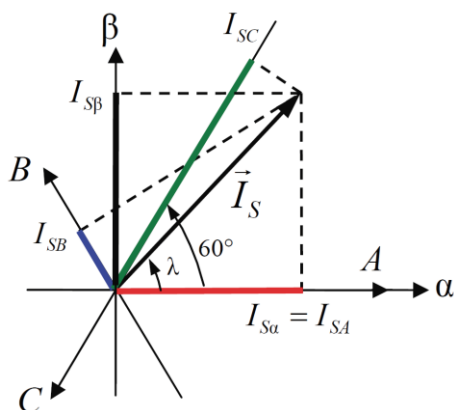


Рис. 3 – Системы векторного преобразования координат

В такой системе координат уравнение основ цепи статора любого двигателя в системе $\alpha\beta$:

$$\begin{cases} U_{s\alpha} = i_{s\alpha} R_s + \frac{d\Psi_{s\alpha}}{dt} \\ U_{s\beta} = i_{s\beta} R_s + \frac{d\Psi_{s\beta}}{dt} \end{cases}, \quad (6)$$

и уравнение момента для $\alpha\beta$:

$$M = \Psi_{s\alpha} i_{s\beta} - \Psi_{s\beta} i_{s\alpha}, \quad (7)$$

Становится очевидно, что для определения момента по формуле (7) асинхронного двигателя достаточно статорных переменных, сопротивления R_s , и можно не иметь информации о процессах, проходящих в цепи ротора, в том числе и его типа.

При реализации и моделировании ПУМ использовалась схема прямого управления моментом с пространственно-векторной модуляцией (ПУМ-ПВМ). При такой схеме возможно напрямую управлять электромагнитным моментом и потокосцеплением, но при этом нужно знать точное положение вектора, определяемое через коммутированные ключи инвертора [10].

Рассматривая реализацию блока коммутации ключей инвертора на рис. 4, предположим, что вектор потокосцепления находится в 1-ом секторе. Тогда гарантированным увеличением потокосцепления достигается состояние инвертора «100» (включен верхний транзистор фазы А, нижних В, С). Эффективно также будут справляться с поддержанием потока соседние секторы «100» и «101». Для увеличения электромагнитного момента следует применять вектора «010» и «110», а для уменьшения «101» и «101». Уменьшение потокосцепления можно добиться, выбирая другие оставшиеся секторы: «000», «111», «001», «010», «011» [11].



Рис. 4 – Пример набора векторов напряжения с вектором потокосцепления, расположенным в 1-ом секторе

Таким образом, по местоположению вектора потокосцепления можно определить состояние ключа инвертора в каждом из секторов, соответствующий выход регулятора потокосцепления и момента. Результаты таблицы включений ключей инвертора объединены в таблице 2 [11].

Таблица № 2

Таблица коммутации ключей инвертора в системе ПУМ

Условия		Сектор					
		1	2	3	4	5	6
$\Delta\Psi_s > 0$	$\Delta M > 0$	110	010	011	001	101	100
	$\Delta M < 0$	101	100	110	010	011	001
$\Delta\Psi_s < 0$	$\Delta M > 0$	010	011	001	101	100	110
	$\Delta M < 0$	001	101	100	110	010	011

На рис. 6 представлена структурная система управления на базе ПУМ-ПВМ. Желаемыми значениями здесь являются значение электромагнитного момента и значение потокосцепления статора. Блоками осуществляется координатное преобразование в базовый вектор, который затем приходит на

блок с векторной ШИМ, в которой осуществляется коммутация ключей инвертора на основе принятых выше правил. Логика коммутации ключей инвертора осуществляется функцией, описание которой упоминается в таблице 2.

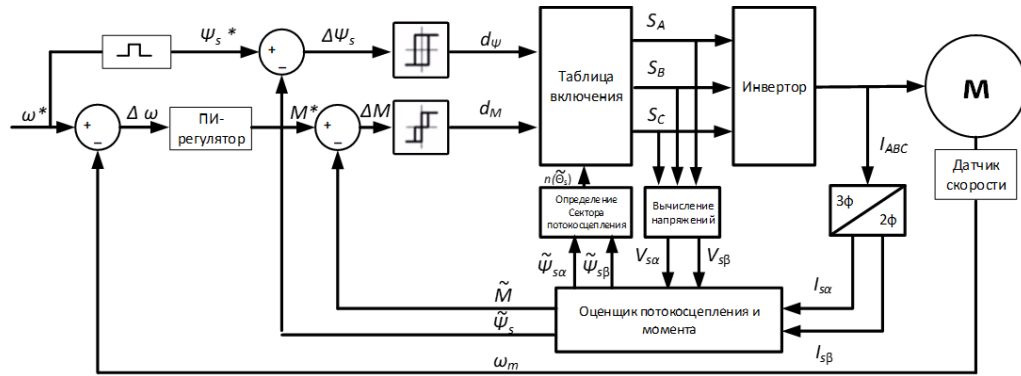


Рис. 6 – Структурная схема управления двигателем с ПУМ-ПВМ

Моделирование

Система управления двигателем электромобиля с прямым управлением момента в системе Matlab/Simulink представлена на рис. 7.

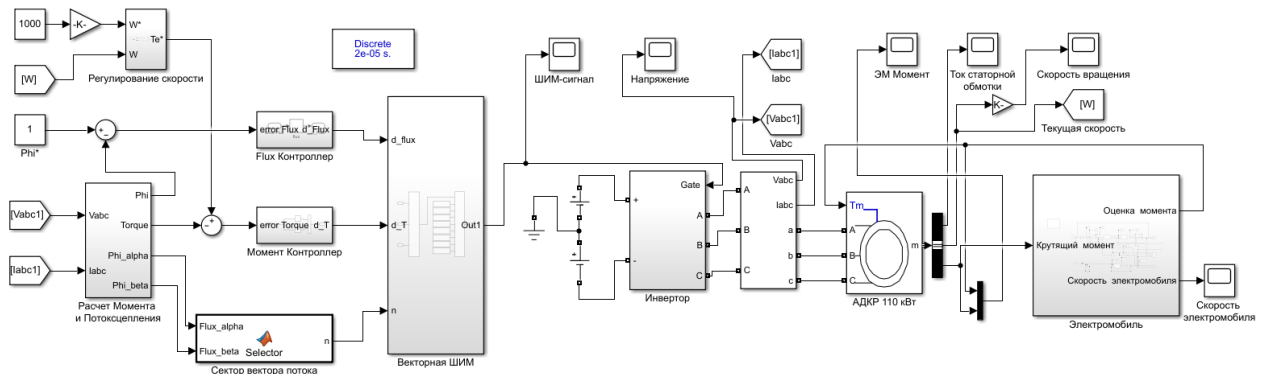


Рис. 7 – Схема управления двигателем в Matlab/Simulink

Целью управления ставилась задача разгона и стабилизации скорости движения электромобиля до 100 км/ч. Для этого к схеме ПУМ-ПВМ добавился блок электромобиль, который вычислял требуемый момент с обратной связью для желаемой скорости движения на основе формул (1-6). Использовались паспортные данные электромобиля Tesla Model S P85 и

асинхронный двигатель из пакета Simulink с близким к эталонному значению крутящего момента мощностью.

На рис. 8, 9 приводятся графики скорости движения электромобиля, скорости вращения двигателя, электромагнитного момента, скорости вращения двигателя, тока статора. Как видно из графиков, скорость электромобиля приводится и стабилизируется в нужном значении, мы можем менять значение электромагнитного момента, переключение осуществляется крайне быстро, оставляя скорость вращения двигателя неизменной, тем самым обеспечивая высокую динамику приводе и электромобилю. Высокие пульсации момента, характерные для ПУМ-ПВМ, практически не сказываются на скорости движения электромобиля.

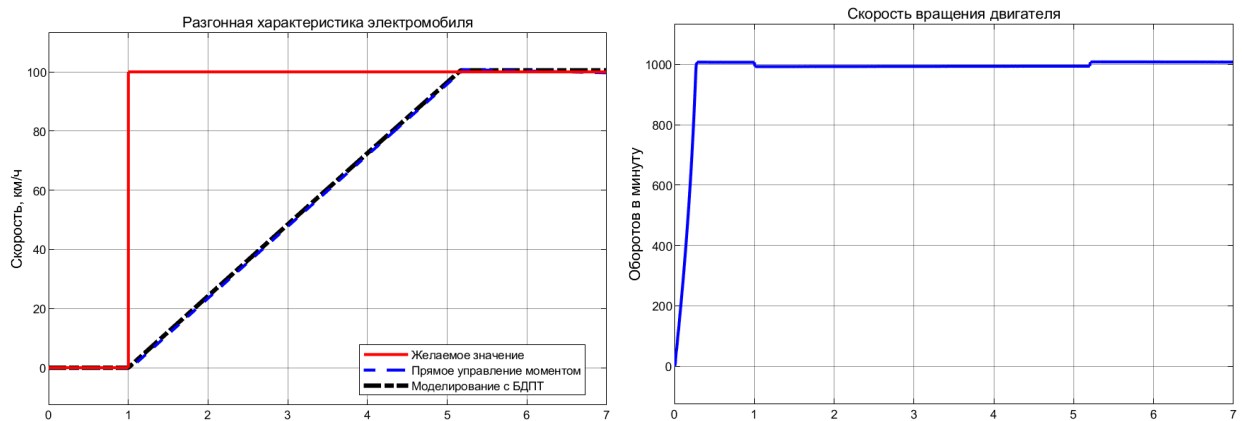


Рис. 8 – Скорость движения электромобиля и вращения двигателя

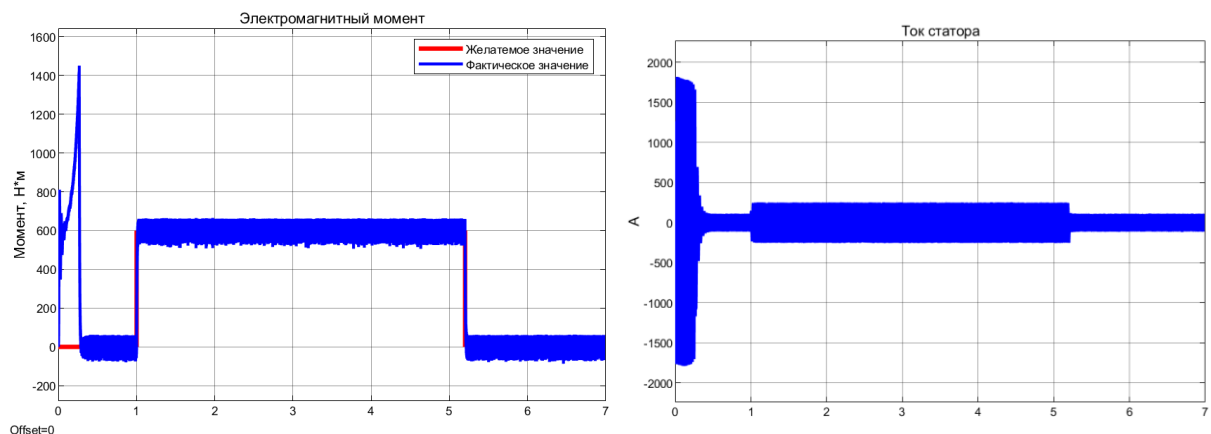


Рис. 9 – Электромагнитный момент и ток статорной обмотки

Заключение

В статье была рассмотрена структура системы управления продольным движением электромобиля с прямым регулированием момента, рассмотрена динамика движения электромобиля, описание схемы с прямым управлением моментом, ее вариация с пространственно-векторной модуляцией на основе коммутируемых ключей инвертора с вектором потокосцепления. Проведенный синтез такой схемы замкнутой системы в системе Matlab/Simulink обеспечивает достижение желаемых выходных характеристик по скорости движения электромобиля, быстрое изменение момента практически не меняя скорость вращения двигателя. Полученные результаты могут быть использованы в подсистеме управления двигателем электромобилем и внедрены в его микропроцессорную систему управления.

**Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-08-00924: «Разработка теоретических основ построения иерархических систем управления силовыми установками электромобилей»*

Литература

1. Смирнов Г.А. Теория движения колесных машин. М.: Машиностроение, 1990. 352 с.
 2. Nam K.W. AC Motor Control and Electrical Vehicle Applications. London: CRC Press, 2019. 449 p.
 3. Bramley M., Mueller A.J., Ritchie R. Drag queens: Aerodynamics compared Car and driver // Car and driver. 2014. №6. pp. 86-92.
 4. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. Иваново: ИГЭУ, 2008. 298 с.
 5. Takahashi I., Noguchi T. A new quick response and high-efficiency control strategy of an induction motor // IEEE Transactions on Industry Applications. 1986. №5. pp. 820–827.
 6. Данилова М.Г., Чернышов С.Ю., Сидоров Е.Н., Основин М.С. Моделирование асинхронного привода с нечетким прямым управлением момента в Simulink // Инженерный вестник Дона, 2014, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2456.
-



7. Toufouti R. Direct torque control for induction motor using intelligent techniques // Journal of theoretical and applied information technology. 2007. №3. pp. 35-44.
8. Попов А.Н. Энергосберегающие регуляторы для систем автоматизированного электропривода // Инженерный вестник Дона, 2016, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3771.
9. Калачев Ю.Н. Векторное регулирование. М.: ЭФО, 2013. 72 с.
10. Zelechowski, M. Space vector modulated - direct torque controlled (DTC-SVM) inverter-fed induction motor drive. Warsaw: WUoT, 2005. 169 p.
11. Анучин А.С. Системы управления электроприводом. М.: МЭИ, 2015. 190 с.

References

1. Smirnov G.A. Teorija dvizhenija kolesnyh mashin [Theory of motion of wheeled vehicles]. М.: Mashinostroenie, 1990. 556 p.
2. Nam K.W. AC Motor Control and Electrical Vehicle Applications. London: CRC Press. 2019. 449 p.
3. Bramley M., Mueller A.J., Ritchie R. Car and driver. 2014. №6. pp. 86-92.
4. Vinogradov A.B. Vektornoe upravlenie jelektroprivodami peremennogo toka [Vector control of AC drives]. Ivanovo: IGJeU, 2008. 298 p.
5. Takahashi I., Noguchi T. IEEE Transactions on Industry Applications. 1986. №5. pp. 820–827.
6. Danilova M.G., Chernyshov S.Ju., Sidorov E.N., Osnovin M.S. Inzhenernyj vestnik Dona, 2014, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2456.
7. Toufouti R. Journal of theoretical and applied information technology. 2007. №3. pp. 35-44.
8. Popov A.N. Inzhenernyj vestnik Dona, 2016, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3771.
9. Kalachev Ju. N. Vektornoe regulirovanie [Vector control]. М.: JeFO, 2013. 72 p.
10. Zelechowski, M. Space vector modulated - direct torque controlled (DTC-SVM) inverter-fed induction motor drive. Warsaw: WUoT, 2005. 169 p.



11. Anuchin A. S. Sistemy upravlenija jelektroprivodom [Electric drive control systems]. М.: MJeI, 2015. 190 p.