

УДК 621.3

ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ НОВЫХ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СОВРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРОКАРОВ
INNOVATIVE TECHNOLOGY OF NEW SYNCHRONOUS MOTORS OF MODERN ELECTRIC CARS

А. А. Антипов

Научный руководитель – С. В. Константинова, к.т.н., доцент
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь
svkon2000@gmail.com

А. Antsipau

Supervisor – S. Konstantinova, Candidate of Technical Sciences, Docent
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** в данной статье отражены основные преимущества синхронного реактивного двигателя с инкорпорированными магнитами перед асинхронным и другими типами синхронных двигателей для современных электрокаров.*

***Abstract:** this article reflects the main advantages of a synchronous jet engine with incorporated magnets over asynchronous and other types of synchronous motors for modern electric cars.*

***Ключевые слова:** двигатель, ротор, магниты, сопротивление, потери.*

***Keywords:** motor, rotor, magnets, resistance, losses*

Введение

В Tesla Model Y, как и в Model 3 используется синхронный двигатель для задних колес, которые являются основными ведущими колесами, а для передних – асинхронный двигатель. Одним из основных достоинств асинхронного перед синхронным двигателем, является относительная простота конструкции ротора, не требующая постоянных магнитов. Вместо них используется короткозамкнутая обмотка в виде беличьей клетки.

Основная часть

В асинхронном двигателе вращающееся магнитное поле создает ток в беличьей клетке ротора. Под действием тока ротора и вращающегося магнитного поля создается сила, которая вращает ротор [2]. Однако в следствии протекания тока по беличьей клетке теряется 3–4 % энергии на нагрев стержней ротора.

Если же заменить ротор с беличьей клеткой на ротор с постоянными магнитами (рис. 1), то такая проблема исчезает. За счет уменьшения потерь на нагрев ротора удастся уменьшить размеры и вес двигателя. Так же благодаря постоянным магнитом ротор вращается синхронно с полем статора. Такая конструкция синхронной машины позволяет избежать использования коллекторных щеток, которые являются слабым местом большинства классических синхронных машин.

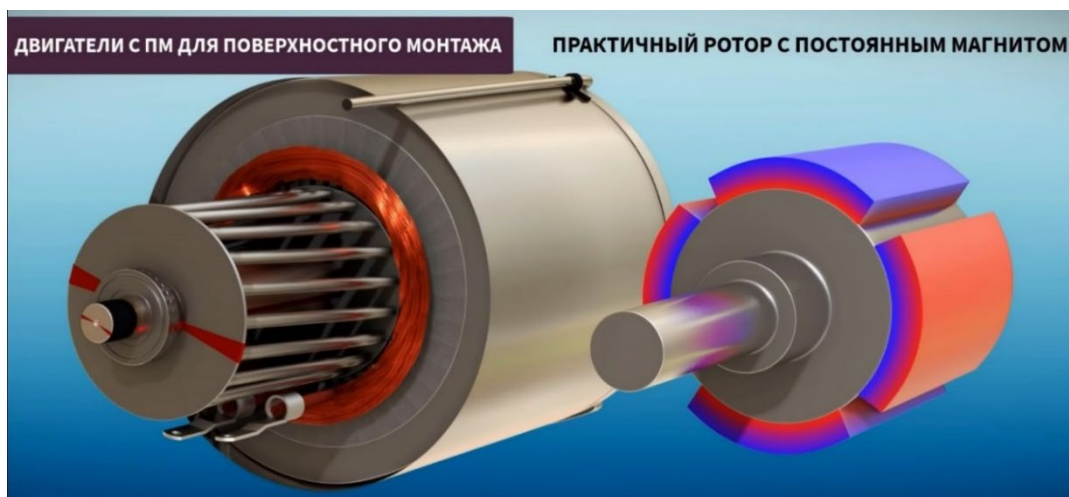


Рисунок 1 – Короткозамкнутый ротор и ротор с постоянными магнитами

Такие двигатели имеют большой крутящий момент, однако на больших скоростях магнитное поле постоянных магнитов ротора индуцирует обратное электромагнитное поле в статоре (рис. 2), что в свою очередь приводит к протеканию тока в статоре, как следствие уменьшается эффективность, увеличиваются потери на вихревые токи и нагрев двигателя [4].

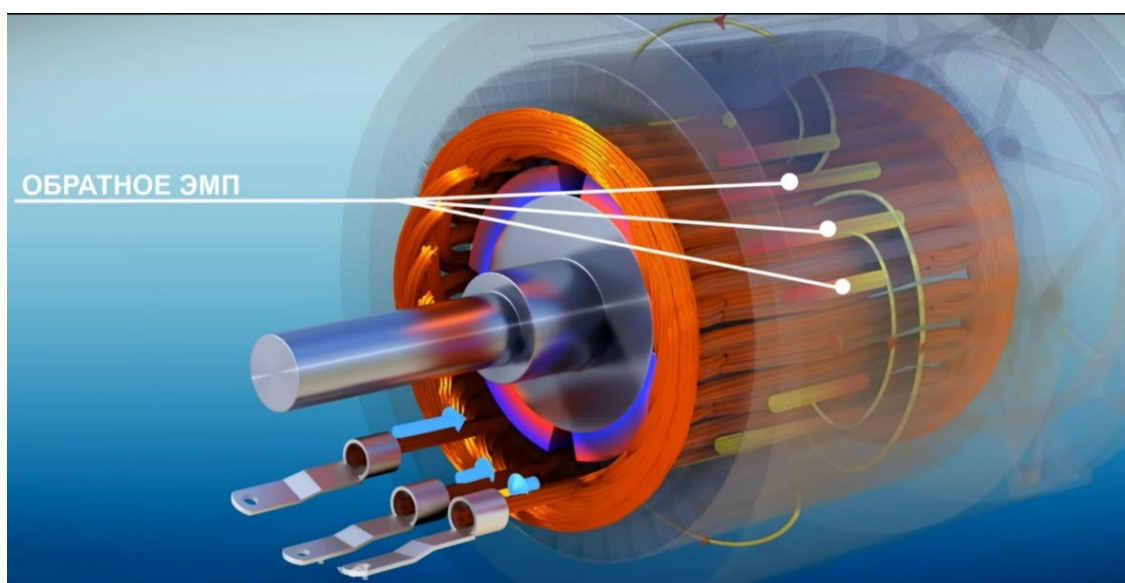


Рисунок 2 – Воздействие обратного ЭМП на статор

Потери, связанные с обратным электромагнитным полем, можно убрать, заменив ротор с постоянными магнитами, на ротор с железным сердечником. В нем используется свойство магнитного сопротивления железа, для этого в роторе делают прорезы, благодаря которым ротор может занимать два положения в пространстве, относительно ВМП, положение с «низким сопротивлением» и положение с «высоким сопротивлением» (рис. 3). Очевидно, что ротор пытается занять положение с «низким сопротивлением», поэтому он устремляется за вращающимся магнитным полем, как следствие начинает вращаться синхронно с ВМП [3]. Такие двигатели не требуют постоянных магнитов, что

определенно делает их дешевле, но имеют малый крутящий момент. Синхронные реактивные двигатели эффективны на больших скоростях, за счет уменьшения потерь относительно двигателя с постоянными магнитами и асинхронного двигателя.

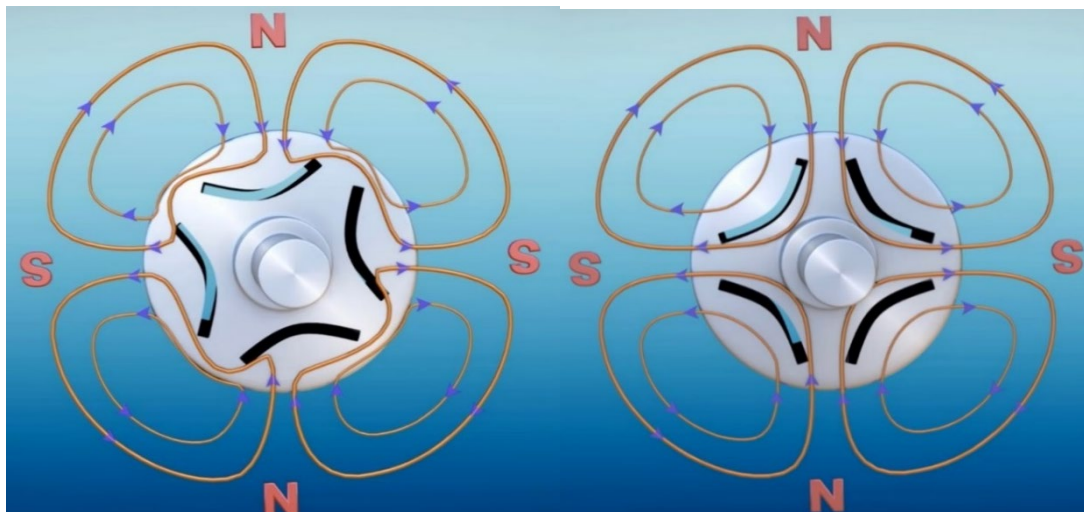


Рисунок 3 – Силовые линии в железном сердечнике

Если же совместить преимущества синхронного реактивного двигателя и двигателя с постоянными магнитами, то мы получим новый тип двигателя – синхронный реактивный с постоянными магнитами (IPMSynRM). В этом двигателе постоянные магниты устанавливаются не на поверхности ротора, а в прорезях и выполняют функцию материала с высоким магнитным сопротивлением для синхронного реактивного двигателя. Проанализировав взаимодействие ВМП с железную часть ротора и с постоянными магнитами, то мы получим график зависимости реактивного момента и момента постоянного магнита.

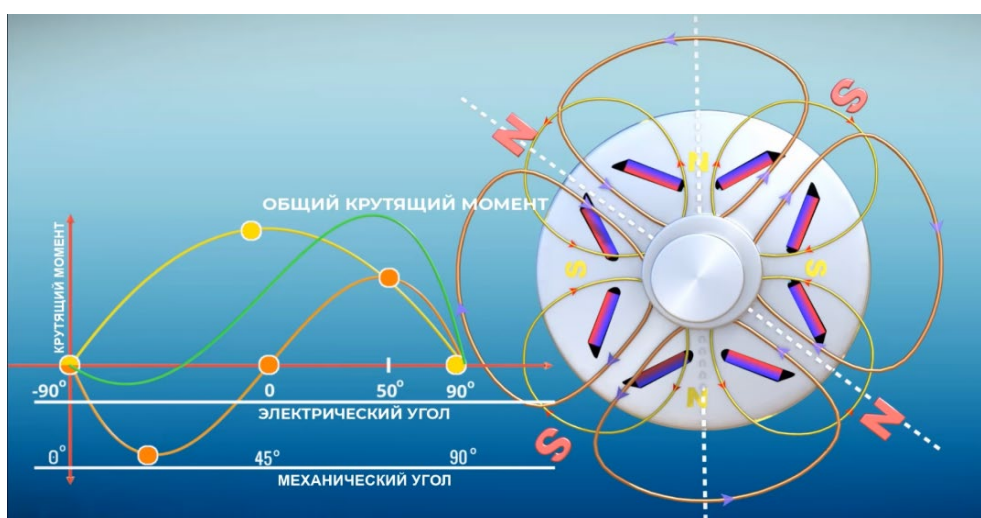


Рисунок 4 – Общий крутящий момент

Максимум крутящего момента от постоянных магнитов наблюдается при электрическом угле равном 90° , а максимальный момент от железной части ротора наблюдается при угле 45° .

Если совместить два графика зависимости электрического угла от крутящего момента на валу ротора, то максимум крутящего момента будет наблюдаться при электрическом угле равном 50° (рис. 4). Поэтому инженеры Тесла позаботились о том, чтобы в момент пуска двигателя угол вращающегося магнитного поля был около 50° .

Чтобы уменьшить или полностью убрать негативный эффект от постоянных магнитов на обмотку статора, инженеры Тесла синхронизировали вращающееся магнитное поле с полем постоянных магнитов, что позволило уменьшить или полностью убрать обратное магнитное поле, индуцируемое в обмотках статора. В таком режиме двигатель работает как реактивный синхронный, без увеличения потерь и нагрева на высоких скоростях.

Математическая модель синхронного реактивного двигателя инкорпорированными магнитами [1] отражает взаимодействие реактивной составляющей и постоянных магнитов, приведены формулы для осей ABC и dq (табл. 1).

Таблица 1 – Математическая модель синхронного реактивного двигателя с постоянными магнитами

Уравнения	Системы координат	
	ABC	dq
Электрической цепи	$u_{abc} = R_s i_{abc} + \frac{d\psi_{abc}}{dt}$	$\begin{cases} u_d = R i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega \psi_q \\ u_q = R i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega \psi_d \end{cases}$
Потокосцеплений	$\psi_{abc} = L_s i_{abc} + \psi_{Mabc}$	$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_M \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases}$
Моменты	$M = p_{\Pi} \left(\frac{1}{2} i_{abc}^T \frac{\partial L_s}{\partial \theta} i_{abc} + i_{abc}^T \frac{\partial \psi_{Mabc}}{\partial \theta} \right)$	$M = \frac{3}{2} p_{\Pi} \left(\psi_M i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \right)$

Заключение

Двигатель IPMSynRM имеет лучший пусковой момент, высокий КПД (до 96 %, против 94 % у асинхронного двигателя), меньший нагрев и упрощенная система охлаждения ротора и лучше масса габаритные показатели.

Литература

1. Буль, О. Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: магнитные цепи, поле и программа FEMM / О. Б. Буль. М.: Издательский центр «Академия», 2005. 336 с.
2. Вольдек, А. И. Электрические машины / А. И. Вольдек. 3-е изд., перераб. Л.: Энергия, 1978. 832 с.
3. Иванов-Смоленский, А. В. Электрические машины / А. В. Иванов-Смоленский. М.: Энергия, 1980. 928 с.