

* * *

Электричество, 2016, № 1, с. 55–65.

Энергосберегающие электрические машины для привода электромобилей и гибридных автомобилей (Обзор зарубежных разработок)

ШУМОВ Ю.Н., САФОНОВ А.С.

Приведен обзор зарубежных публикаций по проблемам энергосбережения для тяговых электродвигателей электромобилей и гибридных автомобилей. Показаны характерные особенности, тенденции развития, способы уменьшения потерь для синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ), асинхронных (АД), вентильно-индукторных реактивных (ВИРД). Рассмотрены методы уменьшения массы постоянных магнитов в СДПМ. Наиболее энергоэффективными являются синхронные машины с постоянными магнитами, в особенности синхронные машины со встроенными ПМ.

Ключевые слова: электрические машины, энергоэффективность, электропривод, электромобили, гибридные автомобили, обзор

Постоянно растущее в мире производство более энергоэффективных конструкций тяговых электродвигателей (ЭД), применение новых электротехнических материалов можно считать технологической революцией в области электрифицированных средств, при этом непрерывно растет парк электромобилей (ЭМ) и гибридных электромобилей (ГЭМ). Согласно прогнозам International Energy Agency в 2030 г. будет произведено 120 млн транспортных средств с электроприводом (включая скутеры, байки и т.д.), и половина из них – электро-

мобили, т.е. будет произведено более 60 млн тяговых ЭД [1]. По прогнозам специалистов Bosch к 2025 г. до 15% выпускаемых во всем мире автомобилей будут ГЭМ [2]; предполагается, что рынок ЭМ к 2025 г. достигнет 500 млрд долл. США, а тяговых ЭД – 25 млрд долл.

С другой стороны, общемировой рынок тяговых ЭД для ГЭМ и ЭМ к 2017 г. можно достигнуть $2,3 \times 10^6$ шт. [4]. Согласно [5] ожидается, что к 2023 г. будет выпущено 147,7 млн ЭД для автомобилей, причем 25% – ЭД для легких ЭМ: скутеров,

электробайков, городских микроавтобусов и т.д. Более чем в 20 раз возрастет число армейских ГЭМ (главным образом грузовиков и тягачей). В 7 раз вырастет рынок гибридных автобусов, в основном за счет рынка крупногабаритных ЭМ, в Китае. Широкий диапазон тяговых ЭД по мощности: от 250–350 кВт для автобусов и тяжелых тягачей, типовые 50–70 кВт для легковых автомобилей, до 0,25 кВт для бюджетных электровелосипедов. Диапазон по моменту: от 6000 Нж для тягачей до 0,2, 0,5 Нж для двухколесных транспортных средств.

Об актуальности проблемы говорят такие факты, что разработкой и исследованием тяговых ЭД для транспортных средств занимаются по всему миру более 30 университетов, исследовательских институтов и лабораторий и более 50 производителей разрабатывают и производят новые типы тяговых ЭД; при этом уделяется значительное внимание их энергоэффективности.

Разработчики тягового привода учитывают не только массу и объем ЭД, но также массу, объем, стоимость других узлов привода: инвертора, конвертера, редуктора и т.д. Желательно, например, минимизировать значение противоЭДС, иначе возникает необходимость установки дополнительного повышающего конвертера, а повышение максимальной частоты вращения ЭД потребует установки дополнительного редуктора. Снижение потерь ЭД позволит отказаться от системы жидкостного охлаждения, перейти на охлаждение от соответствующей системы ДВС (при его наличии) с температурой жидкости до 150 °С или даже на принудительное воздушное охлаждение [6].

Основные требования, предъявляемые к тяговому ЭД: высокий КПД в широком диапазоне нагрузки и частоты вращения n ; высокое значение удельной мощности $P_{уд}$ (кВт/кг) или плотности (кВт/л); высокое значение удельного момента $M_{уд}$ (Нж/кг); приемлемая стоимость.

Характеристика $M = f(n)$ должна содержать горизонтальный участок $M = \text{const}$ в диапазоне $0 - n_{баз}$ и «мягкую» часть, аналогичную серийной характеристике двигателя постоянного тока на участке $n_{баз} - n_{max}$, при этом M уменьшается, а $P = \text{const}$. Желательно, чтобы на этом участке n_{max} и $n_{баз}$ соотносились как 5:1.

Энергоэффективность тягового ЭД определяется не только КПД, но и его массой и объемом, а также максимальной частотой вращения n_{max} . Малая масса способствует уменьшению потерь на трение транспортного средства, малый объем ЭД позволяет разместить дополнительное оборудование, например дополнительные банки аккумуляторной батареи, уменьшенные потери в ЭД увеличивают пробег ЭМ на одной зарядке батареи или уменьшают расход топлива в ГЭМ, а также повышают на-

дежность и упрощают охлаждение ЭД. В последнее время наметилась тенденция увеличивать n_{max} с целью повышения $P_{уд}$, но это может привести к увеличению передаточного числа редуктора или даже к необходимости добавления лишней ступени, что приведет к возрастанию потерь на трение или габаритов редуктора.

В соответствии с исследованиями специалистов США ожидается следующее улучшение массогабаритных показателей ЭМ с 2015 до 2020 гг.: $P_{уд}$ – от 1,3 до 1,6 кВт/кг и $M_{уд}$ – от 5 до 5,7 кВт/кг, общего КПД привода – до 94% [6].

В качестве тяговых в настоящее время используются четыре основных типа ЭД: коллекторные двигатели постоянного тока (ДПТ), асинхронные двигатели (АД), синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ), синхронные двигатели с обмоткой возбуждения на роторе и контактными кольцами (СДКК), вентильно-индукторные реактивные двигатели (ВИРД).

Согласно данным [7] на 2012 г. 33 модели ЭМ в качестве тяговых имели АД, 19 моделей – СДПМ, 3 модели – СДКК, 22 модели – ДПТ. В данной статье мы не рассматриваем ДПТ и СДКК, поскольку первые устанавливаются в бюджетных небольших транспортных средствах, например внутривозвездском транспорте, а вторые используются редко.

Двигатели переменного тока, строго говоря, разделяются на синхронные с синхронизированной ЭДС и бесщеточные постоянного тока (BLDC) с трапецеидальной ЭДС и обратной связью по положению ротора. Поскольку в зарубежных публикациях часто их не разделяют по принципу действия, то условимся называть их синхронными двигателями с постоянными магнитами (СДПМ).

В последнее время первое место завоевывают СДПМ. При этом в качестве ПМ, как правило, используются высокоэффективные ПМ на основе редкоземельных элементов (РЗ), в особенности неодима Nd с добавкой небольшого количества диспрозия. Неодим в настоящее время не является дефицитным и пока имеет приемлемую цену. Однако прогнозируется, что к 2030 г. мировой рынок будет испытывать дефицит РЗ, а цена неодима резко возрастет.

СДПМ разделяются в основном на две группы: с поверхностными магнитами (SPM motor) (СДПММ) и с встроенными ПМ – IPM motor (СДВПМ). Последние находят преимущественное распространение, так как в СДВПМ, кроме составляющей момента, обусловленной полем ПМ (назовем ее магнитной), появляется еще реактивная составляющая, которая расширяет область $P_2 = \text{const}$ на графике $M = f(n)$ и увеличивает мощность при данных габаритах.

Недостатки СДПММ: для ослабления поля в зоне высоких скоростей необходима дополнитель-

ная составляющая тока якоря, которая создает МДС, направленную против потока ПМ; это обстоятельство приводит к увеличению потерь в обмотке [8]. Поскольку магнитное поле ослабевает незначительно, с ростом скорости растет частота перемагничивания, и в зоне высоких скоростей преобладающими потерями являются потери в стали, при этом КПД снижается.

Синхронные машины (СМ) разделяются на две большие группы: с радиальным магнитным потоком и с аксиальным потоком. Наибольшее распространение в качестве тяговых ЭД получили СМ с радиальным потоком.

Рассмотрим особенности некоторых образцов СДПМ с аксиальным потоком.

В **Hokkaido University** совместно с инженерами Kobe Steel разработан и испытан опытный образец аксиального СДПМ с показателями, в основном соответствующими СДВПМ, установленном на Toyota Prius третьего поколения. Поскольку по сравнению с этим ЭД предлагаемый аксиальный ЭД развивает момент в 2 раза больший, то значение частоты вращения принято в 2 раза меньшим, чем у ЭД Prius. Для расширения зоны ослабления потока используется конструкция со встроенным ПМ. Основные показатели предлагаемого СДПМ: $P = 60$ кВт, $M_{уд} = 67,7$ Нж/л, $n_{баз} = 1464$ мин⁻¹, $n_{max} = 6000$ мин⁻¹, $D \cdot L = 264 \times 10^8$ мм. Выяснено, что M_{max} имеет место при фазовом угле $\alpha = 30^\circ$ и плотности тока $j = 20$ А/мм [9].

EVO Electric Ltd. (Англия) серийно выпускает аксиальные СДПМ серии AFM-140 для ЭМ, ГЭМ и др. [10]. Двигатели отличаются компактностью, имеют высокий КПД, малый зубцовый момент, уровень вибрации, соответствующий армейским стандартам, а также высокие значения $P_{уд}$ и $M_{уд}$. Их основные технические характеристики: $P_H = 75$ кВт, $P_{max} = 167,5$ кВт, $n_{max} = 5 \times 10^3$ мин⁻¹, $M = 220$ Н·м, $M_{max} = 400$ Н·м, $M_{нач.пуск} = 600$ Н·м, $P_{уд} = 4,2$ кВт/кг, $M_{уд} = 10$ Н·м/кг, $\eta = 96,5\%$, $D \cdot L = 380 \cdot 115,2$ мм, $G = 40$ кг, жидкостное охлаждение.

YASA motors (Англия) выпускает три типоразмера аксиальных СДПМ [11], характеризующихся высокими значениями КПД и $P_{уд}$. Так, YASA 400 имеет следующие технические данные: $M_{max} = 360$ Нж, $P_{max} = 165$ кВт, $P_H = 85$ кВт, $\eta_{max} = 95\%$, $n_{max} = 7500$ мин⁻¹, $G = 24$ кг, охлаждение масляное.

YASA 750 и YASA 400 имеют $P_{уд} = 10$ кВт/кг, а $M_{уд} = 15/20$ Н·м/кг, что гораздо больше, чем у аналогов. По своим показателям они пригодны для применения в качестве тяговых. Например, 4 ЭД типа YASA 750 используются для индивидуального привода колес на гоночной Drayson Racing [11].

Общепринятой является конструкция СДПМ с внутренним ротором. Двигатели с внешним ротором используются для мотор-колес или же в случае, когда можно повысить $P_{уд}$ за счет увеличения радиуса ротора.

Tm 4 Electrodynamic Systems (Канада) выпускает СДПМ с высокими показателями. Двигатель имеет многополюсный внешний ротор. Такая конструкция принята для увеличения M и исключения редуктора. Некоторые его технические данные: $P = 120$ кВт, $M_H = 170$ Нж, $G = 26$ кг, $P_{уд} = 4,8$ кВт/кг, $M_{уд} = 6,54$ Нж/кг.

Большое число полюсов в сочетании с внешним ротором способствовало увеличению КПД и $P_{уд}$; провод – прямоугольный с целью увеличения коэффициента заполнения паза. Зубцовый момент небольшой благодаря особой форме паза. Значение КПД в рабочем диапазоне составляет более 95%. Разрабатываются также несколько типоразмеров на значения момента до 1600 Нж и мощности до 200 кВт. Назначение этих ЭД – привод гибридных автобусов, фургонов, грузовиков, тракторов и т.д. [6, 12].

СДПМ стандартной конструкции имеют узкий диапазон регулируемой частоты вращения 2:1 при $P = \text{const}$ относительно базовой частоты вращения $n_{баз}$ на графике $M, P = f(n)$. Обычно для ЭМ и ГЭМ требуется диапазон до 5:1.

В СДПМ, используемом в ГЭМ Toyota Prius, объединены СДПМ и реактивный синхронный двигатель (РД). Магниты размещены в отверстиях V-образной формы в сердечнике ротора. Поскольку магнитное сопротивление ПМ велико, то индуктивность по продольной оси d меньше, чем по поперечной q . За счет разности индуктивностей образуется реактивная составляющая момента, значительно расширяющая область частоты вращения с $P = \text{const}$ до 1:5 и увеличивающая КПД до 97%. Благодаря меньшим потерям СДПМ со встроенными магнитами (СДВПМ) требует менее интенсивного охлаждения, чем стандартный СД, поэтому можно ограничиться принудительным воздушным. Это удешевляет привод, так как не требуется специальной системы жидкостного охлаждения [3].

Примером СДВПМ является двигатель, разработанный General Electric (GE). В 2012 г. были проведены испытания прототипа этого ЭД, на разработку которого было выделено 5,6 млн долл. США. Двигатель имел улучшенные характеристики, более высокий КПД, меньшие габариты, был более дешевым по сравнению с аналогами. Максимальная мощность 55 кВт, удельная мощность при старте почти в два раза больше, КПД на 3–5% выше, напряжение меньше (200 вместо 650 В, что важно для инвертора). Разрабатываемый ЭД может работать при температуре охлаждающей жидкости

до 105 °С вместо 65 °С у аналогов, поэтому для его охлаждения не требуется специальной системы для циркуляции охлаждающей жидкости, можно использовать систему охлаждения ДВС.

Рассматриваемый СДВПМ — компактен: использование концентрической обмотки позволило уменьшить вылет лобовых частей и аксиальную длину ЭД, $D' L = 234' 130$ мм, а удельная мощность почти в 2 раза выше, чем у аналогов. Предполагается наладить промышленное производство этих ЭД в текущем году. Также в GE разработаны ПМ с повышенным в 3 раза электрическим сопротивлением, что позволяет уменьшить потери от полей высших гармонических в магнитах.

В планах GE также разработка ЭДПМ без использования РЗПМ [13].

В электромобилях Nissan Leaf установлен СДВПМ, $P = 80$ кВт, $M = 280$ Нжл, $n_{\max} = 10390$ мин⁻¹. Конструкция ЭД рассчитана на массовое производство, КПД привода (ЭД + инвертор + кабель) достигает 95%. Магниты встроены в сердечник ротора и образуют \tilde{N} -образную фигуру). ЭД разработан на основе СДПМ, используемом в модели 2005 г. x-Trail FCV. Некоторые конструктивные данные: $G = 59$ кг, $2p = 8$, $Z_1 = 48$, обмотка однослойная, сталь с $D = 0,3$ мм. Обмоточный провод (0,75 мм) покрыт полиэמידной пленкой (AIW). Обмотка укладывается намоточным станком, плотность тока высокая, коэффициент заполнения паза 0,7, магниты для уменьшения потерь в них от вихревых токов разбиты на блоки, охлаждение ЭД водяное.

При разработке конструкции данного ЭД изучались разные варианты конфигурации ПМ. Сравнивалось V- и \tilde{N} -образное расположение ПМ. Пришли к выводу, что конфигурация \tilde{N} более оптимальна как по мощности, так и по моменту. Система привода Nissan вошла в список лучших машин 2011 г. «Word's 10 best engines list 2011» [15, 16].

Фирма BMW для ЭМ BMWi3 и BMWi8 изготовила СДВПМ, на конструкцию которого получен патент (заявка Германии 2012/0267977). В этом СДВПМ уменьшена масса ПМ и в основном используется реактивная составляющая момента. Так, для такого ЭД в BMWi3 на $P = 125$ кВт удельная мощность $P_{уд} = 2,5$ кВт/кг. В области $P_2 = \text{const}$ зависимость $M = f(n)$ линейная до $n_{\max} = 11400$ мин⁻¹. В Nissan Leaf в 2011 г. был установлен СДПМ, $P = 80$ кВт, $G = 58$ кг, $P_{уд} = 1,35$ кВт/кг, т.е. разработанный СДВПМ имеет не только большое значение $P_{уд}$, но и высокий КПД [17].

Недостатком СДВПМ является то, что несинусоидальность магнитного поля в воздушном зазоре из-за зубчатости статора и наличие реактивной составляющей момента при V-образной конфигурации ПМ способствуют появлению пульсирующей

составляющей момента. Форма и расположение ПМ в сердечнике ротора является важным фактором. Методом конечных разностей моделировали два ЭД такого же типа и размеров, как у Toyota Prius, причем один с числом фаз $m = 3$, другой с $m = 5$. При этом задавались разными расстояниями от вершины угла в V-конфигурации до периферии ротора. За счет оптимального значения этого расстояния при $m = 5$ получено минимальное значение пульсации: оно снизилось с 26% от $M_{ср}$ (в оригинальной конструкции) до 8% (при $m = 5$) [18].

Требования к тяговым СДПМ для гибридных электромобилей:

большое значение момента при трогании и малые скорости в момент старта;

большое значение мощности при скоростном движении;

максимальный КПД в широком диапазоне M и n ;

большой диапазон частоты вращения n при постоянной мощности, превышающий 2–5-кратное значение $n_{\text{баз}}$;

оптимальное соотношение между M_{\max} и кажущейся мощностью инвертора;

способность к кратковременным перегрузкам, обычно $M_{\max} = 2M_N$;

малое значение «зубцового» момента;

конструкция ротора с ориентацией ПМ на оптимальное соотношение индуктивностей L_d/L_q . За счет соответствующего выбора этого соотношения в СДВПМ Prius 2012 г. реактивный момент $M_p = 60\%$, а магнитный $M_{\text{маг}} = 40\%$ [19].

Увеличение числа пар полюсов приводит, с одной стороны, к уменьшению массы и габаритов СДПМ, а с другой, к уменьшению h на 1–2% в диапазоне $p = 1, \dots, 10$, так как увеличивается частота тока, а с ней и магнитные потери.

Концентрическая обмотка имеет малый размер лобовых частей, что способствует уменьшению потерь и габаритов. Распределенная обмотка имеет высокое значение обмоточного коэффициента, что позволяет уменьшить число витков обмотки, однако их лобовые части занимают много места, поэтому объем обмотки возрастает. Таким образом, объем машины с распределенной обмоткой больше, чем с концентрической, но КПД выше по причине меньшего числа гармоник и снижения потерь в стали.

В СМПМ с малым значением p потери в обмотке увеличиваются, а в стали уменьшаются, поэтому использовать их нежелательно. При необходимости иметь высокий КПД и малые пульсации момента предпочтительнее СМПМ с распределенной обмоткой. Если желательно при малом объеме иметь большое значение удельной мощности, тогда предпочтительнее применить концентрическую обмотку.

ку, которая для СДПМ, особенно многополюсных, приобретает все большую популярность.

В [20] предложена новая конструкция СДПМ с дробным числом пазов на полюс и фазу $q = 4/5$. Известна конструкция СДПМ с $Z_1 = 12$, $2p = 10$, $q = 2/5$. В такой машине обмотка – концентрическая с малым вылетом лобовых частей, что по сравнению с общепринятым сочетанием $Z_1 = 48$, $2p = 8$, $q = 2$ обеспечивает уменьшение массы меди и электрических потерь в обмотке. Недостатки такой конструкции – большое содержание высших гармоник большой амплитуды, в основном 5-й и 7-й, значительно повышающих добавочные потери в сердечнике и увеличивающих радиальные усилия, создающие вибрацию и шум. Для устранения этих недостатков предлагается число пазов увеличить до 48, а в дополнительных пазах уложить вторую обмотку с $m = 3$, питающуюся от того же инвертора. В результате значительно уменьшаются высшие гармоники, снижаются вибрации, шум и добавочные потери. Такая конструкция по сравнению с СДПМ Prius обеспечивает увеличение КПД до 8%, в особенности в диапазоне малых и сверхмалых нагрузок.

СДПМ имеет малую способность к ослаблению поля в зоне $P = \text{const}$, поскольку индуктивность обмотки L имеет малое значение ввиду большого эквивалентного немагнитного зазора (воздушный зазор + ПМ с большим магнитным сопротивлением). Для увеличения L в последнее время находят широкое применение обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу $q < 1$, например в мотор-колесах. Дополнительные преимущества таких обмоток – возможность их выполнения в виде зубцовых, т.е. катушка охватывает зубец и её можно выполнять как соленоидную, уменьшив при этом коэффициент заполнения паза, а вылет лобовых частей минимален. Для уменьшения аварийности применяют однослойную дробную обмотку, при которой зубцы обматываются через один. При этом фазы изолированы друг от друга физически, магнитно и термически. Двухслойная обмотка, при которой обматывается каждый зубец, снижает пульсацию момента и добавочные потери от вихревых токов, но уменьшает и зону ослабления поля. При выборе дробного q следует учесть, что при некотором сочетании обмоточный коэффициент уменьшается. Так, при $q = 0,5$ он равен 0,866, а при $q = 2/7$ – 0,945 [21].

Protean Electric разработал встроенный в колесо СДПМ с жидкостным охлаждением, его некоторые данные: $M_{\text{max}} = 800 \text{ Нжл}$, $n_{\text{баз}} = 1000 \text{ мин}^{-1}$, $n_{\text{max}} = 2000 \text{ мин}^{-1}$, $D = 420 \text{ мм}$, $L = 115 \text{ мм}$, $G = 31 \text{ кг}$. На внутренней поверхности внешнего ротора установлены ПМ, магниты не утоплены, так что реактивный момент отсутствует. Из-за большого

эквивалентного немагнитного зазора индуктивность обмотки L имеет очень малое значение. Положение спасает применение обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу. Такая обмотка имеет большое дифференциальное рассеяние, за счет чего индуктивность обмотки сохраняется на приемлемом уровне и позволяет обеспечить зону $P = \text{const}$, хотя и не столь большую, как у встраиваемых ПМ, но вполне приемлемую.

Отличительная особенность конструкции Protean – инвертор расположен внутри кольцеобразного статора [21].

Широкого распространения в качестве тяговых синхронные реактивные двигатели (СРД) не получили, хотя в промышленном исполнении находят применение, например, в частотно-регулируемом приводе насосов. Реактивный момент (момент от реакции якоря) создается за счет образования разных магнитных проводимостей по осям d и q . В наиболее популярной конструкции (патент США 5818140) эта разность обеспечивается образованием в роторе нескольких U-образных полостей, называемых барьерами. Данные опытного образца СРД, выполненного в габаритах АД: $P = 5,5 \text{ кВт}$, $P_{\text{max}} = 28 \text{ кВт}$, $M_{\text{max}} = 150 \text{ Нжл}$ при $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$, $M_{\text{max,уд}} = 28 \text{ Нжл/л}$, $\eta = 89\%$. Достоинства тягового СРД: отсутствие ПМ и короткозамкнутой обмотки на роторе; меньшая стоимость изготовления, чем у АД; более простая схема векторного управления. Недостатки: необходимость датчика положения ротора, по сравнению с АД более узкий диапазон регулирования частоты вращения при $P = \text{const}$; меньшее значение $\cos \phi$; большая кажущаяся мощность инвертора; меньшее значение η [22].

Характеристики СРД можно улучшить, если в барьерных полостях разместить ПМ небольшой толщины. Тогда, кроме реактивного момента, появится магнитная составляющая, что в итоге увеличивает $P_{\text{уд}}$ и $M_{\text{уд}}$, расширит область $P = \text{const}$. Выполнен опытный образец СРДПМ с параметрами: $P = 110 \text{ кВт}$, $2p = 6$, ПМ (NdFeB) толщиной 3 мм, $n_{\text{баз}} = 1200 \text{ мин}^{-1}$, $\eta = 0,9...0,93$, $n_{\text{max}} = 2800 \text{ мин}^{-1}$. Характеристики АД и СРДПМ близки, $\cos \phi$ для СРДПМ во всем диапазоне n около 0,8, у СРД – 0,54. Утверждается, что такой СРДПМ нельзя считать полноценным СДВПМ [22].

Аналогичный подход для получения характеристик СРД исследован в **University Paderborn** (Германия). В опытном образце в барьерные полости ротора встраивались ПМ из феррита FB14H. Технические данные СРДПМ: $P_{\text{max}} = 55 \text{ кВт}$, $P_{\text{H}} = 30 \text{ кВт}$ при $n = 2800 \text{ мин}^{-1}$, $n_{\text{max}} = 14 \times 10^3 \text{ мин}^{-1}$. Область $P = \text{const}$ – 5:1, $D_a = 300 \text{ мм}$, $l_d = 75 \text{ мм}$, $D_2 = 183,5 \text{ мм}$, $h_{\text{ПМ}} = 5 \text{ мм}$, $G_{\text{ПМ}} = 1,5 \text{ кг}$, $B_r = 0,43 \text{ Тл}$, $d = 0,66 \text{ мм}$, $G = 37 \text{ кг}$, ротор имеет 4 барьерных U-образных отверстия, $M_{\text{H}} = 102,3 \text{ Нжл}$ при $n = 2800 \text{ мин}^{-1}$.

Пульсирующий момент $10,8\% M_{ср}$, что велико, $\cos j = 0,72 \dots 0,88$, $\eta = 95\%$ до $n = 2800 \text{ мин}^{-1}$, затем падает до 86% (при $n = 14 \times 10^3 \text{ мин}^{-1}$). Вывод: СРДПМ с ферритовым ПМ является хорошей альтернативой СДВПМ для ЭМ [24].

В СДВПМ, установленном в ГЭМ Toyota Prius 2012, стоимость ПМ составила 81% общей стоимости материалов. Организация NEDO (Япония) в 2008 г. запустила проект по разработке ЭД без РЗПМ. При этом должны соблюдаться следующие условия: габариты ЭД, $P_{уд}$ и η должны быть сопоставимы с таковыми у двигателей с РЗПМ.

Отдельные направления в проекте NEDO [19]: разработка ВИРД для следующего поколения ГЭМ Prius; аксиальный СД с сегментированным ротором и ферритовыми ПМ (разработка Hokkaido Univ.); СРД с дополнительными ПМ и ступенчатым зазором также для следующего поколения ГЭМ Toyota Prius.

Правительство США озабочено проблемой, связанной с возможным в будущем дефицитом некоторых РЗМ, в особенности неодима и диспрозия. Магниты на этих элементах отличаются очень высокой энергией, поэтому широко используются в мире, в особенности в тяговых СДПМ и в генераторах ветростанций. Прогнозируется значительный дефицит упомянутых элементов к 2030 г., а значит, значительный рост их стоимости. Правительственная организация США (Агентство передовых исследовательских проектов – APRA) выделяет значительные средства для разработки новых высокоэнергетических ПМ без использования РЗМ, а также конструкций двигателя с ПМ, содержащего минимум этих элементов или вовсе их не содержащего. При этом на каждый такой проект выделяется грант до 3 млн долл. США. Так, в соответствии с планами APRA фирма **QM Power** разрабатывает тяговый СДПМ без использования ПМ мощностью $P_{max} = 270 \text{ л.с.}$ **Baldor Electric** разрабатывает тяговый ЭД без использования РЗПМ с высоким значением $P_{уд}$ и более низкой стоимости, чем аналоги. **University of Texas at Dallas** работает над проектом двухстаторного тягового ВИРД мощностью $P = 100 \text{ кВт.}$ Утверждается, что разрабатываемый ЭД будет иметь очень высокое значение $P_{уд}$ и гораздо меньшую стоимость, чем аналоги. К тому же он сможет работать при более высоких температурах и в худших условиях. **Case Western Reserve University** разрабатывает для тяговых ЭД и ветрогенераторов высокоэффективные ПМ на основе железо-нитридных сплавов. **Northeastern University** разрабатывает ПМ на основе кристаллической структуры железо-никелевых соединений, которые по своим характеристикам будут соответствовать лучшим образцам ПМ, но значительно дешевле; такие соединения обнаружены только в метеори-

тах. **Darhmouth College** разрабатывает высокоэффективные ПМ на основе соединений марганец-алюминий, а **Pacific Northwest National Laboratory** – высокоэффективные ПМ на основе наносоединений марганца. **Alabama University** работает с композитами материалов, основанных на соединении марганца и железа. **University of Minnesota** разрабатывает высокоэффективные ПМ, основанные на композициях железо-нитрид. **Virginia Commonwealth University** работает над созданием высокоэффективных ПМ на основе углерода, **Ames Laboratory** проводит исследования по созданию ПМ на основе достаточно распространенного элемента церия, который в четыре раза дешевле неодима. Срок завершения контрактов большинства проектов – до 2015 г. Как итог проекта – прототип ЭДПМ с новыми ПМ или сами ПМ [25].

Ряд организаций разрабатывают новые конструкции СДПМ, в которых в качестве ПМ используются ферриты. Так, в Hokkaido University при участии Dynaх Согр. разработан и исследован опытный образец аксиального СДПМ для мотор-колеса городского электромобиля. Понижающий плоский редуктор с передаточным числом 5:1 располагается внутри статора. Обмотка статора с дробным $q = 9/24$ – концентрическая с катушками соленоидного типа. Такая обмотка благодаря повышенному значению дифференциального рассеяния имеет приемлемое значение индуктивности, что способствует расширению области ослабления поля при $P = \text{const}$ за счет регулирования фазового угла. Некоторые данные СДПМ: $D_a = 200 \text{ мм}$, $D_2 = 202 \text{ мм}$, $L = 71,7 \text{ мм}$, $2p = 16$, $Z_1 = 18$, $d = 1,2 \text{ мм}$, $P_{max} = 5 \text{ кВт}$, $M_{max} = 300 \text{ Нжл}$, $V = 1,43 \text{ л}$, $(M/V)_{max} = 20,97 \text{ Нжл/л}$, $n_{баз} = 1600 \text{ мин}^{-1}$, $n_{max} = 5000 \text{ мин}^{-1}$, ПМ – феррит, реактивная составляющая момента отсутствует, сердечник ротора плоский немагнитный из нержавеющей стали, на котором располагаются плоские ПМ. Внутри статора со стороны, противоположной редуктору, установлен датчик положения ротора. Эксперименты показали, что в рабочей области $\eta > 90\%$, наибольший $\eta = 95\%$ – при $n = 3400 \text{ мин}^{-1}$. Пульсирующая составляющая момента $0,97\%$, зубцовая – $0,27\%$ среднего максимального значения момента при плотности тока $11,2 \text{ А/мм}^2$; температура ПМ составляла $75 \text{ }^\circ\text{C}$ [26].

Nova Torque разработала аксиальный вентильный двигатель постоянного тока с ферритовыми ПМ (ДПМФ). У таких магнитов остаточная индукция составляет $0,38 \text{ Тл}$, а у редкоземельного NdFeB – примерно 1 Тл . Для того чтобы в ЭД обеспечить значение потока, сопоставимое с таковой при РЗПМ, поверхность ПМ должна быть больше поверхности полюса. С этой целью используется принцип концентрации потока, его эффективнее

использовать при аксиальной конструкции ДПМ. Испытания опытных образцов показали, что СДПМФ характеризуются высоким значением h – выше, чем у предусмотренного стандартами ЕС коэффициента энергоэффективности IЕ3. Данные опытного образца мощностью $P=3,75$ кВт: $n=1800$ мин⁻¹, $M_H = 20$ Нжл, $h = 93\%$, $D \cdot L=179 \cdot 300$ мм, $G = 30$ кг. Отмечается высокое значение h в широком диапазоне n . Конструкция предусматривает встраиваемое расположение ПМ, что обеспечивает наличие не только магнитной составляющей момента, но и реактивной. Для сердечника использована изотропная сталь, а обмотка – соленоидного типа без лобовых частей, что уменьшает потери. В настоящее время опытные ЭД используются для привода вентиляторов, но возможна разработка ДПМФ для тягового привода [27].

Интенсивные работы по созданию СДПМ без РЗПМ ведутся в Европе. В 2011 г. был разработан прототип СДПМ с ПМ на ферритах в рамках проекта «**Motor Brain**». К 2014 г. этот двигатель усовершенствован и вместо 90 кг (первый прототип) весит 77 кг при $P = 60$ кВт. В его доведении до промышленного образца участвуют 30 партнеров из 9 стран Европы, в том числе **Siemens**, **Infeneon Technologies**; бюджет проекта – 36 млн евро. Благодаря более высокому КПД этот СДПМ обеспечил для опытного электромобиля на одной подзарядке аккумуляторов пробег 180–190 км, вместо 150 км. Назначение разрабатываемого ЭД – в составе тягового привода для ЭМ третьего поколения; утверждается, что общий КПД привода с таким ЭМ возрастет на 20%. Если судить по фотографии на выставке, ротор имеет многополюсную конструкцию со встроенными ПМ, причем использован принцип концентрации потока, а инвертор встроен с торца ЭД [28].

Второе место по энергоэффективности после СДПМ во многих случаях занимают АД. Первоначально в качестве тягового АД зарекомендовал себя в успешном ЭМ модели EV-1 фирмы **General Motors**. Двигатель имеет высокий КПД во всем диапазоне частоты вращения, но его максимальное значение меньше, чем у аналогичного СДПМ. Поэтому использование АД целесообразно при необходимости иметь высокое значение КПД во всем диапазоне частоты вращения. Когда же требуются высокая мощность и быстродействие, то необходима сложная и дорогая схема управления. Выбор АД желателен, в частности, для ГЭМ с последовательной системой привода, так как в такой системе ЭМ должна быть рассчитана на максимальную мощность ДВС во всем диапазоне частоты вращения. Синхронная машина с ПМ, рассчитанная на полную мощность, дороже, чем АД, но может оказаться предпочтительнее из-за меньших габаритов и

массы. При параллельной системе выбор ЭД зависит от редуктора, и если предполагается работа на малой частоте вращения, то предпочтение следует отдать СМПМ, так как в диапазоне малых частот вращения её КПД выше, чем у АД. Малые габариты СМПМ упрощают компоновку привода. Кроме того, при параллельной системе требуется ЭМ меньшей мощности, чем при последовательной, поэтому её стоимость будет значительно меньше.

Выбор типа ЭМ для привода ГЭМ зависит от возможного режима работы. Если предполагается, что значительную часть времени предстоит работа на малых скоростях (старт-стопный режим в городских условиях), то предпочтительна СМПМ с её более высоким КПД. Если предполагается работа в высокочастотном диапазоне, то наибольший КПД может быть у ВИРД. При работе на средних значениях частоты вращения, выше $n_{баз}$ вплоть до высокой, то с точки зрения КПД выбор за АД.

Многочисленные исследования показали, что при использовании в качестве тягового больше подходит АД с медной обмоткой ротора, отлитой под давлением (АДМО) [29].

В **Массачусетском технологическом институте** (MIT) совместно с Copper Development Association проведено сравнительное исследование АДМО и СДПМ. При этом основные исходные характеристики принимались одинаковыми: $P_2 = 50$ кВт при $n = 1200–1540$ мин⁻¹, $n_{max} = 6000$ мин⁻¹, $P_{раб} = 12–22$ кВт (данные СДВПМ для ГЭМ Toyota Prius). При заданном значении $h = 91\%$ габариты АДМО меньше, чем СДПМ, а при заданных одинаковых габаритах КПД у АДМО выше, чем у СДПМ. Установлено также, что потери холостого хода у АДМО меньше, чем у СДПМ [30, 31].

Согласно данным специалистов Siemens удельная мощность $P_{уд}$ (кВт/кг) у тягового АД меньше, чем у ЭД ПМ, но он имеет стратегическое преимущество, заключающееся в отсутствии ПМ. Недостаток АД: его момент уменьшается более существенно, чем у СДПМ, при высоких частотах вращения. Планируемое дальнейшее улучшение показателей АД – использование электротехнической стали с улучшенными электрическими и механическими свойствами и оптимизация системы охлаждения. Перегрузочная способность АД (при средних значениях частоты вращения) достаточна: при $P_H = 50$ кВт он может непродолжительное время нести нагрузку 120 кВт [32].

На основе анализа конструкции и технических данных 212 электромобилей и гибридных автомобилей выявлено, что 63% армейских ГЭМ и около 52% большегрузных «гибридных» автобусов используют в качестве тяговых АД.

Ведущий производитель ГЭМ – Toyota использует АД для автобусов и ведет разработки совмест-

но с **Tesla Motors** для легковых машин ГЭМ, в которых в настоящее время используются СДПМ [5].

Согласно данным [7] на 2012 г. тяговые АД были установлены на 33 моделях ЭМ.

Известный производитель ЭМ и ГЭМ **Tesla Motors** в своих моделях устанавливает АДМО, например в **Tesla Motors Model S**.

AC Propulsion (США) выпускает 3 типоразмера тяговых АДМО: АС-75 ($P_{\max} = 75$ кВт, $M_H = 122$ Нж, $D' L = 305' 250$ мм, $n_{\text{баз}} = 6000$ мин⁻¹, $n_{\max} = 13000$ мин⁻¹, $P_H = 27$ кВт, $G = 34$ кг, охлаждение воздушное принудительное), АС-150 ($P_{\max} > 150$ кВт, $M_{\max} > 225$ Нж, $D' L = 290' 368$ мм, $n_{\max} = 13000$ мин⁻¹, $P_H = 40$ кВт, $G = 50$ кг, охлаждение воздушное принудительное), ЛСМ-150 (жидкостное охлаждение, $P_{\max} > 200$ кВт, $M_{\max} > 280$ Нж, $G = 50$ кг, $D' L = 159' 324$ мм, $P_{\text{уд}} = 6,3$ кВт/л). Все ЭД имеют термозащиту со встроенными термодатчиками и датчик положения ротора. Конструкция ротора с медной литой обмоткой защищена патентом. Все ЭД характеризуются высокими значениями $P_{\text{уд}}$ (особенно ЛСМ-150) и КПД в широком диапазоне n . Недостаток: небольшой диапазон n (1, 2, 2) [33].

Ansaldo Energia (Италия) производит комплектные системы электропривода (ЭД + инвертор) ЭМ и ГЭМ для городских видов транспорта, причем в качестве тяговых ЭД используются АД модульной конструкции с жидкостным охлаждением. Системы привода имеют 30 модификаций на $P = 7,5-180$ кВт [34].

Недостатки АД в тяговом приводе: малое значение опрокидывающего момента в области $P = \text{const}$, уменьшение КПД и увеличение потерь и скольжения в зоне высоких частот вращения, более низкий КПД по сравнению с СДПМ из-за наличия основных и добавочных потерь в обмотке ротора, низкий $\cos \varphi$, способствующий увеличению расчетной мощности инвертора [35]. Кроме того, специалисты **Toyota** отмечают нестабильность работы тягового АД на малых оборотах.

Обычное частотное управление не обеспечивает необходимых характеристик АД из-за нелинейности динамической характеристики. Поэтому следует использовать управление, ориентированное на магнитное поле, в частности векторное управление [36].

Применяемый в тяговом приводе ВИРД не получил пока широкого распространения. Несмотря на кажущуюся простоту и надежность конструкции ему присущ ряд недостатков. Так, технология его изготовления должна быть прецизионной, поскольку, как и у всякой индукторной машины, он должен иметь минимальный воздушный зазор; такому двигателю присущи большой пульсирующий момент, вибрация и акустический шум. В некото-

рых случаях, если не принимать специальных мер, пульсирующий момент может достигать 50% $M_{\text{ср}}$. Необходимы также значительное усложнение схемы и алгоритма системы управления, получение профилированной в динамическом режиме формы кривой тока, профилирование поверхности полюсов, увеличение числа фаз до $m = 5$. К достоинствам можно отнести способность ослаблять поле в области $P = \text{const}$ характеристики $M = f(n)$.

В качестве тягового ВИРД используют компании **Nidec**, **Rocky Mountain Technologies**, **Le Tourneau**, **Satcon**.

В **Punch Powertrain** (Бельгия) разработан опытный образец ВИРД и исследован в системе электропривода на опытном ГЭМ. Некоторые технические данные: $M_{\max} = 200$ Нж, $P_{\max} = 30$ кВт, $P_H = 1,5$ кВт, $n = 1, 10000$ мин⁻¹, $D' L = 225' 275$ мм. Испытания показали, что при обычной схеме управления пульсация момента и акустический шум велики. Для их уменьшения принято $m = 4$ и профилирование формы тока с помощью сложной схемы управления. Кроме сложности схемы управления с использованием обратных связей, другим недостатком является увеличение числа фаз вместо традиционного $m = 3$, поэтому число питающих кабелей составляет 8 вместо 6. Исследования показали, что на большей части зоны рабочего цикла КПД привода (ЭД + инвертор) достигал 90%, отмечена повышенная пульсация момента при малых частотах вращения [37].

Компания **HEVT** (США), специализирующаяся на разработке электропривода для ГЭМ, получила грант на разработку прототипа ВИРД на основе принадлежащих ей патентов. В новой модификации ВИРД уменьшен уровень вибрации, при этом исследовано более 20 тяговых приводов и прототип ВИРД установлен на **Ford F-150**. В последнее время **HEVT** разрабатывает ВИРД для электробайков [38].

В **Tokio Univ. of Sciency** разработан ВИРД для **Toyota Prius** на 50 кВт в габаритах СДВПМ **Toyota Prius**, его $\eta = 95\%$. Приняты меры по снижению шума и вибраций [39].

Несмотря на недостатки, присущие ВИРД, многие разработчики и изготовители считают их применение в тяговом приводе перспективным. По энергоэффективности они уступают СДВПМ и находятся приблизительно на одном уровне с АД.

В [40] сравнивались показатели, в особенности КПД трех типов ЭД: СДВПМ, АДМО, ВИРД. Параметры СДВПМ соответствовали параметрам этого двигателя, установленного на **Toyota Prius**, модель 2004 г. (3-е поколение). Для ВИРД было принято сочетание полюсов $p_1/p_2 = 18/12$ и $m = 3$. Так как частота f у ВИРД при $n_{\text{баз}} = 1500$ мин⁻¹ составляла 300 Гц, а при $n_{\max} = 6000$ мин⁻¹ – 1200 Гц, то

особенно тщательно исследовались магнитные потери. У АД СДВПМ частота f в 3 раза меньше, чем у ВИРД. При $n_{\text{баз}} = 1500 \text{ мин}^{-1}$ у СДВПМ преобладали потери в обмотке, а при $n_{\text{max}} = 6000 \text{ мин}^{-1}$ – магнитные потери (особенно в зубцах); КПД у СДВПМ, АД, ВИРД при 1500 мин^{-1} был равен, соответственно, 91,3%, 83,1%, 85,2%, при $n = 6000 \text{ мин}^{-1}$ – 96,1%, 95,2%, 88,1%. Сделан вывод, что эффективность СДВПМ выше, чем у АДМО и ВИРД.

Выводы. 1. Крупные зарубежные компании, осуществляющие массовое производство электромобилей и гибридных автомобилей, в качестве тяговых предпочитают синхронные двигатели с постоянными магнитами и асинхронные двигатели с медной обмоткой ротора, отлитой под давлением, причем первым отдаётся явное предпочтение.

2. Поскольку в стоимости материалов, используемых для производства синхронных двигателей с постоянными магнитами, преобладающая доля принадлежит редкоземельным постоянным магнитам, к тому же ожидается значительный рост их стоимости, усилия многих специалистов направлены как на разработку новых сплавов и марок постоянных магнитов, так и на создание таких конструкций двигателей, в которых магниты из сплавов с редкоземельными металлами либо заменяются, например, ферритами, либо снижается содержание редкоземельных металлов в конструкции двигателя.

3. Расширяется область применения синхронных двигателей с концентрическими (зубцовыми) обмотками и с дробным числом пазов на полюс и фазу.

4. Вентильно-индукторные реактивные двигатели, хотя и считаются перспективными в качестве тяговых, не находят пока массового применения в этом качестве, так как для снижения пульсации момента, вибрации и акустического шума необходимо значительно усложнить блок управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Electric** mobility electric motors – mobility & motors-pictures of the future. 15 april 2013: www.siemens.com/innovation/en/home/pictures-of-the-future/mobility-and-motors.html
2. **Greencar** congress: Hybrids Bosch GEO: 15 % of new cars by 2025 to be at least a hybrid: www.greencarcongress.com/hybrid
3. **Electric** motors for hybrid and pure electric vehicles 2015–2025: Land, Water, Air: www.electricvehiclesresearch.com/research/
4. **Strategic** analysis of electric motor technologies for electric and hybrid vehicles in Europe. March 2012: http://www.researchandmarkets.com/reports/2137040/strategic_analysis_of_electric_motor_technologies
5. **Electric** motors for electric vehicles 2013–2023: forecasts, technologies, players. November 2013: http://www.researchandmarkets.com/reports/2496420/electric_motors_for_electric_vehicles_20132023
6. **Final** report on assessment of motor technologies for traction drives of hybrid and electric vehicles. 2011. ORNL/TM-2011/73: wiki.ornl.gov/sites/publications/files/pub/pub28840.pdf
7. **Santiago J. et al.** Electrical motor drivelines in commercial all electric vehicles: a review: www.diva-portal.org/smash/get/diva2:436561/FULLTEXT03
8. **Funken T.** Design and optimization of an IPMSM with fixed outo dimension for application in HEVs.— Electric Machines and Drives conf. (IEMDC'09). – IEEE, 2009, pp. 1743–1743.
9. **Arakawa T. et al.** Examination of an interior permanent magnet type axial gap motor the hybrid electric vehicle. – Magnetics IEEE Tr., 2011, vol. 47, No. 10, pp. 3602–3605.
10. **AFM-140** Axial Flux motor: <http://www.evo-electric.com/inc/files/AFM-140-Spec-Sheet-V1.1.pdf>
11. **YASA** motors. Products: www.jasamotors.com/product
12. **Sumo** data sheet tm4: www.tm4.com/wp-content/uploads/2013/11/tm4-sumo-datasheet-FR.pdf.
13. **A world-class** traction motor for hybrid and electric vehicles: <http://www.geglobalresearch.com/innovation/world-class-traction-motor-hybrid-electric-vehicles>
14. **Guglielmi P. et al.** Permanent-magnet minimization in PM-assisted synchronous reluctance motors for wide speed.
15. **Sato V. et al.** Development of high response motor and inverter system for Nissan Leaf electric vehicle. – SAE technical paper, 2011, No. 2011-01-0350.
16. **Oki S., Ishikawa S., Ikemi T.** Development of high-power and high-efficiency motor for newly developed electric vehicle. – SAE technical paper, 2012, No. 2012-01-0342.
17. **BMW's** hybrid motor design seems to deliver high efficiency and power density with lower rare earth use. 13 Aug. 2013: www.greencarcongress.com/2013/08/bmw-20130812.html
18. **Aslan B. et al.** Influence of rotor structure and number of phases on torque and flux weakening characteristics of V-shape interior PM electrical machine. – Journal of energy and power engineering, 2012, vol. 6, pp. 1461–1471.
19. **Rahman M.A.** Modern high efficiency interior permanent magnet motors: www.ieee-pes.org/.../PESGM2014.P_002604.pdf
20. **Gerling D., Dajaku G.** Comparison of different methods for efficiency improvement of the electrical drive-train: [https://dokumente.unibw.de/pub/bscw.cgi/d6830412/2012%20FKFS12%20\(Gerling%20-%20Dajaku%20-%20M%C3%BChbauer\).pdf](https://dokumente.unibw.de/pub/bscw.cgi/d6830412/2012%20FKFS12%20(Gerling%20-%20Dajaku%20-%20M%C3%BChbauer).pdf)
21. **Zijian L.** Fractional slot concentrated-winding surface-mounted permanent magnet motor design and analysis in-wheel applications: Doctoral diss. – Politecnica di Torino, 2012.
22. **Malan J., Kamper M.J.** Performance of a hybrid electric vehicle using reluctance synchronous machine technology. – IEEE Tr. an Ind. appl., 2001, vol. 37, No. 5, pp. 1319–1324.
23. **Silande S.E., Kamper M.J., Wans R.** Design and performance evaluation of a medium power using bonded PM-sheets. – SAIEE Africa Research Journal, 2006, vol. 97, No. 1, pp. 14–21.
24. **Paradcar M., Boecker J.** Design of a high performance ferrite magnet-assisted synchronous reluctance motor. – IECON-2012 – 38th Annual conf. on IEEE. Ind. Electronics Soc. – IEEE 2012, pp. 4099–4103.
25. **Efficient** high-torque electric vehicle motor / APRA-E: <http://arpa-e.energy.gov/?q=slick-sheet-project/efficient-high-torque-e-electric-vehicle-motor>
26. **Sone K. et al.** A ferrite PM in-wheel motor without rare earth material for electric city commuters. – Magnetics, IEEE Tr. on., 2012, vol. 48, No. 11, pp. 2961–2964.

27. **Petro J.** Achieving high electric motor efficiency — EEMODS 2011 — paper 060: http://www.novatorque.com/aboutus/white-papers/060_John_Petro_final_paper.pdf

28. **Compact** and efficient electromotor without rare earth metals: <https://assrv2.haw-aw.de/motorbrain/>

29. **Шумов Ю.Н., Сафонов А.С.** Энергоэффективные асинхронные двигатели с медной обмоткой ротора, отлитой под давлением (обзор зарубежных публикаций). — *Электричество*, 2014, № 8, с. 56–61.

30. **The value** of using cast copper induction motors in hybrid and plug-in electric vehicles: http://www.copper.org/applications/automotive/electric-vehicles/value_cast_copper.html

31. **Kirtley J.L.** Traction motor design consideration: http://web.mit.edu/kirtley/www/doe_kirtley_may_2011.pdf

32. **Electric** mobility electric motors — mobility & motors pictures of the future. 15 april 2013: www.siemens.com/innovation/en/home/pictures-of-the-future/mobility-and-motors.html

33. **AC-150/Air** cooled motor: <http://www.acpropulsion.com/pressreleases/Press%20Release%20AC%20Propulsion%20EVS26.pdf>

34. **Ansaldo** Electric Drives: www.ansaldoenergia.com

35. **Nashermnia N., Asaei B.** Comparative study of using different electric motors in the electric vehicles. — *Electrical Machines*, 2008. ICEM 2008. 18th Int. conf. on IEEE, 2008, pp. 1–5.

36. **Chan K.T., Chan C.C., Chunhua Liu.** Overview of permanent magnet brushless drives for electric and hybrid electric vehicles. — *IEEE Tr. on Ind. Electronics*, 2008, vol. 55, No. 6, pp. 2246–2256.

37. **Faid S., Debal P., Bervoet S.** Development of a switched reluctance motor for automotive traction applications: www.punchpowertrain.com/files/Docs/publications

38. **Non rare** earths in next generation electric vehicles: <http://ens-newswire.com/2012/11/23/no-rare-earths-in-next-generation-electric-vehicles/>

39. **Tokeno M. et al.** Test results and torque improvement of the 50 kW switched reluctance motor designed for hybrid electric vehicles. — *Broms Journal Magazines Ind. appl., IEEE Tr.*, vol. 48, No. 4, 2012.

40. **Dorrel D.G. et al.** Comparison of different motor design drives for hybrid electric vehicles. — *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)* — IEEE, 2010, pp. 3352–3359.

[08.09.15]

А в т о р ы : Шумов Юрий Николаевич окончил электромеханический факультет Московского энергетического института (МЭИ) в 1960 г. В 1980 г. защитил в МЭИ кандидатскую диссертацию «Теоретические и экспериментальные исследования асинхронных генераторов». Профессор кафедры «Электрические системы» Московского государственного машиностроительного университета (МАМИ).

Сафонов Александр Сергеевич окончил энергетический факультет Московского государственного открытого университета в 1999 г. В 2003 г. защитил кандидатскую диссертацию «Встроенные электромеханические системы, совмещенные с сельскохоз-зайственным механизмом». Доцент кафедры «Электрические системы» МАМИ.

Elektrichestvo (Electricity), 2016, No. 1, pp. 55–65.

Energy-Saving Electrical Machines for Driving Electric and Hybrid Vehicles (a Review of Foreign Developments)

SHUMOV Yurii Nikolayevich (*Moscow State Mechanical Engineering University (MSMEU), Moscow, Russia*) — *Professor, Cand. Sci. (Eng.)*

SAFONOV Aleksandr Sergeyeovich (*MSMEU, Moscow, Russia*) — *Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)*

The article contains a review of foreign publications on matters concerned with development and manufacture of fundamentally new designs of energy-efficient and energy-saving traction electrical machines for electric and hybrid vehicles. Large foreign companies producing electric and hybrid vehicles on a mass scale prefer using, as traction machines, permanent-magnet synchronous motors and induction motors with pressure-cast copper rotor winding, the former being obviously most preferred ones. Since the rare-earth permanent magnets applied in permanent-magnet synchronous motors account for a predominant part in the cost of materials used for manufacturing such motors, and since the cost of these magnets is expected to grow considerably in the future, the efforts taken by many developers are aimed at elaborating new alloys and types of permanent magnets, as well as at developing motor designs in which the magnets made of alloys containing rare-earth metals are either replaced by, e.g., ferrites or using motor designs with a decreased content of rare-earth metals. The application field of synchronous motors with concentric (tooth) windings and with a fractional number of slots per pole and phase tends to expand. Although converter-fed reluctance inductor motors are considered to be promising ones for traction applications, they nonetheless have not hitherto found mass-scale use for these purposes because their control unit needs significant complication for achieving lower levels of torque pulsations, vibration, and acoustic noise.

Key words: *electrical machines, energy conservation, electric drive, electric vehicles, hybrid vehicles, review*

REFERENCES

1. **Electric** mobility electric motors – mobility & motors-pictures of the future. 15 april 2013: www.siemens.com/innovation/en/home/pictures-of-the-future/mobility-and-motors.html
2. **Greencar** congress: Hybrids Bosch GEO: 15 % of new cars by 2025 to be at least a hybrid: www.greencarcongress.com/hybrid
3. **Electric** motors for hybrid and pure electric vehicles 2015–2025: Land, Water, Air: www.electricvehiclesresearch.com/research/
4. **Strategic** analysis of electric motor technologies for electric and hybrid vehicles in Europe. March 2012: http://www.researchandmarkets.com/reports/2137040/strategic_analysis_of_electric_motor_technologies
5. **Electric** motors for electric vehicles 2013–2023: forecasts, technologies, players. November 2013: http://www.researchandmarkets.com/reports/2496420/electric_motors_for_electric_vehicles_20132023
6. **Final** report on assessment of motor technologies for traction drives of hybrid and electric vehicles. 2011. ORNL/TM-2011/73: wiki.ornl.gov/sites/publications/files/pub/pub28840.pdf
7. **Santiago J. et al.** Electrical motor drivelines in commercial all electric vehicles: a review: www.diva-portal.org/smash/get/diva2:436561/FULLTEXT03
8. **Funken T.** Design and optimization of an IPMSM with fixed outoz dimension for application in HEVs // Electric Machines and Drives conf. (IEMDC'09). – IEEE, 2009, pp. 1743–1743.
9. **Arakawa T. et al.** Examination of an interior permanent magnet type axial gap motor the hybrid electric vehicle. – Magnetics IEEE Tr., 2011, vol. 47, No. 10, pp. 3602–3605.
10. **AFM-140** Axial Flux motor: <http://www.evo-electric.com/inc/files/AFM-140-Spec-Sheet-V1.1.pdf>
11. **YASA** motors. Products: www.jasamotors.com/product
12. Sumo data sheet tm4: www.tm4.com/wp-content/uploads/2013/11/tm4-sumo-datashet-FR.pdf
13. **A world-class** traction motor for hybrid and electric vehicles: <http://www.geglobalresearch.com/innovation/world-class-traction-motor-hybrid-electric-vehicles>
14. **Guglielmi P. et al.** Permanent-magnet minimization in PM-assisted synchronous reluctance motors for wide speed.
15. **Sato V. et al.** Development of high response motor and inverter system for Nissan Leaf electric vehicle. – SAE technical paper, 2011, No. 2011-01-0350.
16. **Oki S., Ishikawa S., Ikemi T.** Development of high-power and high-efficiency motor for newby developed electric vehicle. – SAE technical paper, 2012, No. 2012-01-0342.
17. **BMW's** hybrid motor design seems to deliver high efficiency and power density with lower rare earth use. 13 Aug. 2013: www.greencarcongress.com/2013/08/bmw-20130812.html
18. **Aslan B. et al.** Influence of rotor structure and number of phases on torque and flux weakening characteristics of V-shape interior PM electrical machine. – Journal of energy and power engineering, 2012, vol. 6, pp. 1461–1471.
19. **Rahman M.A.** Modern high efficiency interior permanent magnet motors: www.ieee-pes.org/.../PESGM2014.P_002604.pdf
20. **Gerling D., Dajaku G.** Comparison of different methods for efficiency improvement of the electrical drive-train: [https://dokumente.unibw.de/pub/bscw.cgi/d6830412/2012%20FKF%20S12%20\(Gerling%20-%20Dajaku%20-%20M%C3%BChlbauer\).pdf](https://dokumente.unibw.de/pub/bscw.cgi/d6830412/2012%20FKF%20S12%20(Gerling%20-%20Dajaku%20-%20M%C3%BChlbauer).pdf)
21. **Zijian L.** Fractional slot concentrated-winding surface-mounted permanent magnet motor design and analysis in-wheel applications: Doctoral diss. – Politecnica di Torino, 2012.
22. **Malan J., Kamper M.J.** Performance of a hybrid electric vehicle using reluctance synchronous machine technology. – IEEE Tr. on Ind. appl., 2001, vol. 37, No. 5, pp. 1319–1324.
23. **Silande S.E., Kamper M.J., Wans R.** Design and performance evaluation of a medium power using bonded PM-sheets. – SAIEE Africa Research Journal, 2006, vol. 97, No. 1, pp. 14–21.
24. **Paradcar M., Boecker J.** Design of a high performance ferrite magnet-assisted synchronous reluctance motor. – IECON-2012 – 38th Annual conf. on IEEE. Ind. Electronics Soc. – IEEE 2012, pp. 4099–4103.
25. **Efficient** high-torque electric vehicle motor / APRA-E: <http://arpa-e.energy.gov/?q=slick-sheet-project/efficient-high-torque-e-electric-vehicle-motor>
26. **Sone K. et al.** A ferrite PM in-wheel motor without rare earth material for electric city commuters. – Magnetics, IEEE Tr. on., 2012, vol. 48, No. 11, pp. 2961–2964.
27. **Petro J.** Achieving high electric motor efficiency. – EEMODS 2011 – paper 060: http://www.novatorque.com/aboutus/white-papers/060_John_Petro_final_paper.pdf
28. **Compact** and efficient electromotor without rare earth metals: <https://assrv2.haw-aw.de/motorbrain/>
29. **Shumov Yu.N., Sofanov A.S.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2014, No. 8, pp. 56–61.
30. **The value** of using cast copper induction motors in hybrid and plug-in electric vehicles: http://www.copper.org/applications/automotive/electric-vehicles/value_cast_copper.html
31. **Kirtley J.L.** Traction motor design consideration: http://web.mit.edu/kirtley/www/doe_kirtley_may_2011.pdf
32. **Electric** mobility electric motors – mobility & motors pictures of the future. 15 april 2013: www.siemens.com/innovation/en/home/pictures-of-the-future/mobility-and-motors.html
33. **AC-150/Air** cooled motor: <http://www.acpropulsion.com/pressreleases/Press%20Release%20AC%20Propulsion%20EVS26.pdf>
34. **Ansaldo** Electric Drives: www.ansaldoenergia.com
35. **Nashermnia N., Asaei B.** Comparative study of using different electric motors in the electric vehicles. – Electrical Machines, 2008. ICEM 2008. 18th Int. conf. on IEEE, 2008, pp. 1–5.
36. **Chan K.T., Chan C.C., Chunhua Liu.** Overview of permanent magnet brushless drives for electric and hybrid electric vehicles. – IEEE Tr. on Ind. Electronics, 2008, vol. 55, No. 6, pp. 2246–2256.
37. **Faid S., Debal P., Bervoet S.** Development of a switched reluctance motor for automotive traction applications: www.punchpowertrain.com/files/Docs/publications
38. **Non rare** earths in next generation electric vehicles: <http://ens-newswire.com/2012/11/23/no-rare-earths-in-next-generation-electric-vehicles/>
39. **Tokeno M. et al.** Test results and torque improvement of the 50 kW switched reluctance motor designed for hybrid electric vehicles. – Broms Journal Magazines Ind. appl., IEEE Tr., vol. 48, No. 4, 2012.
40. **Dorrel D.G. et al.** Comparison of different motor design drives for hybrid electric vehicles. – Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) – IEEE, 2010, pp. 3352–3359.