

## Проектирование тяговых частотно-регулируемых двигателей

В.Я. Беспалов<sup>1</sup>, А.Б. Красовский<sup>2</sup>, М.В. Панихин<sup>2</sup>, В.Г. Фисенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> НИУ “МЭИ”, Москва 111250, Россия

<sup>2</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва 105005, Россия

*Показаны преимущества использования тягового электропривода в трансмиссиях транспортных средств. Дан анализ исходного многополюсного тягового асинхронного двигателя. Приведены результаты расчетов, на основе которых предложен альтернативный вариант тягового асинхронного двигателя.*

**E-mail: [bespalovvy@rambler.ru](mailto:bespalovvy@rambler.ru), [krasovsky@bmstu.ru](mailto:krasovsky@bmstu.ru),  
[misha3333@rambler.ru](mailto:misha3333@rambler.ru), [ficenkovg@rambler.ru](mailto:ficenkovg@rambler.ru)**

**Ключевые слова:** *тяговый электропривод, многополюсный асинхронный двигатель, скин-эффект, коэффициент увеличения добавочных потерь.*

В настоящее время в связи с повсеместным ужесточением экологических норм в мире наблюдается бурный рост внедрения энергосберегающих систем. Значительный вклад по выбросам в атмосферу вредных веществ вносят транспортные средства, поэтому именно их можно рассматривать как объект дальнейших исследований. Усовершенствование механической трансмиссии для передачи момента от двигателя внутреннего сгорания (ДВС) к ведущим колесам через карданный вал с коробкой передач и другие промежуточные механизмы практически себя исчерпало: такая механическая схема (ДВС — ведущие колеса) имеет КПД менее 80 %.

Рост цен на энергоносители, забота об экологии и повышение надежности механизма — основные причины, по которым абсолютное большинство мировых производителей транспортных средств уже длительное время ведут разработки гибридного привода, а также привода, основанного исключительно на электрической тяге. Использование силовой и коммутирующей электроники значительно повысило возможность массового внедрения тяговых электроприводов с разными типами электрических машин в транспортных средствах.

Применение гибридной электротрансмиссии по сравнению с механической позволяет:

- снизить в несколько раз уровни выбросов вредных веществ;
- обеспечить экономию топлива от 25 до 50 %;
- обеспечить запуск ДВС, генерацию и рекуперацию электроэнергии с накоплением и последующим использованием ее;
- использовать ДВС меньшей мощности (снижение мощности до 30 % по сравнению с традиционной схемой) при сохранении момента на колесах;

- организовать работу ДВС в оптимальном режиме по топливной эффективности и выбросам;
- осуществить автономный ход на электротяге, используя только энергию накопителя;
- повысить комфортность автомобиля (снизить шум, вибрацию, улучшить управляемость) и КПД трансмиссии;
- повысить надежность и ресурс механической системы торможения и работы автомобиля в целом.

Приведем некоторые исходные данные анализируемого тягового асинхронного двигателя (АД) с короткозамкнутым ротором: мощность на валу  $P_n = 60$  кВт; число полюсов  $2p = 30$ ; частота тока в обмотке статора  $f_n = 500$  Гц при номинальной частоте вращения  $n_n = 2000$  мин<sup>-1</sup>;  $f_{max} = 1250$  Гц при  $n_{max} = 5000$  мин<sup>-1</sup>; высота элементарного проводника обмотки статора 3,55 мм.

При столь высоких частотах тока возникает вопрос о добавочных потерях в АД. В связи с этим был выполнен расчет электромагнитного поля в пазу статора АД. Глубина проникновения поля в медный проводник обмотки статора при номинальной и максимальной частоте составляла соответственно

$$h_{500} = \sqrt{\frac{1}{\pi\mu_0 g_{Cu115} f_n}} = 3,515 \text{ мм};$$

$$h_{1250} = 2,2 \text{ мм}.$$

Здесь  $\mu_0$  — магнитная проницаемость воздуха;  $g_{Cu115}$  — удельная проводимость меди при температуре 115 °С, соответствующей предельной температуре нагрева изоляции класса *H*.

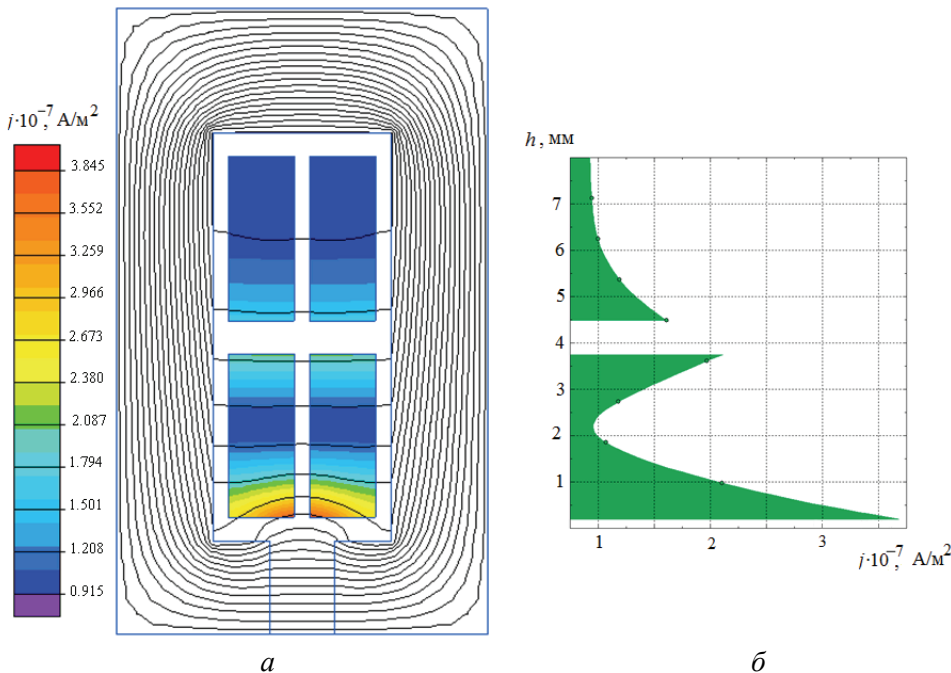
Как видим, при номинальной частоте глубина проникновения равна высоте проводника, а при максимальной — существенно меньше ее. Следовательно, в проводниках обмотки статора имеет место ощутимое проявление скин-эффекта.

Для его количественной оценки были выполнены численные расчеты электромагнитного поля в пазу статора. Результаты этих расчетов представлены на рис. 1.

Установлено, что коэффициент  $k_\phi$  увеличения электрических потерь в обмотке статора при номинальной частоте  $k_{\phi 500} = 1,21$ , а при максимальной  $k_{\phi 1250} = 2,15$ . Такое увеличение потерь для номинальной частоты находится в пределах допустимого, а для максимальной — чрезмерным. Это накладывает более жесткие требования на систему охлаждения и класс изоляции обмоток.

В обмотке ротора вследствие низкой частоты тока в рабочих режимах добавочными электрическими потерями можно пренебречь. Тем не менее для снижения частоты тока в обмотке статора (повышения КПД двигателя) представляется целесообразным примерно вдвое уменьшить число полюсов двигателя.

Кроме того, были проведены расчеты ослабления потока в результате демпфирующего действия вихревых токов в шихтованной стали статора при повышенных частотах для толщины листа 0,28 мм. Расчеты показали, что при  $f_n = 500$  Гц ослабление потока в шихтованной стали составляет 0,42 %, а при  $f_{max} = 1250$  Гц — 2,5 %. Отметим, что для листов стали толщиной 0,5 мм при частоте 50 Гц ослабление потока составляет 0,043 %.



**Рис. 1.** Картина поля в пазу статора тягового АД мощностью 60 кВт (а) и эпюра распределения плотности тока  $j$  по высоте  $h$  паза при частоте 1250 Гц (б)

По имеющимся данным был выполнен поверочный расчет тягового АД как на основе численных полевых расчетов [1], так и с помощью классических методик [2], использующих теорию цепей.

Фрагмент картины поля в поперечном сечении АД в номинальном режиме (по опытным данным  $I_n = 146$  А,  $f_n = 500$  Гц,  $s_n = 5,8$  %,  $M_n = 310$  Н·м,  $P_n = 60$  кВт) приведен на рис. 2.

Расчеты поля АД показали, что электромагнитный момент  $M = 330$  Н·м. Следовательно, момент на валу будет достаточно близок к заданному (после вычитания механических и электрических потерь в роторе).

На рис. 3 показаны зависимости электромагнитного момента АД от скольжения  $s$ , полученные по результатам численных полевых расчетов (кривая 1) и с помощью классических аналитических методик (кривая 2), при линейном напряжении между фазными обмотками двигателя  $U_{л} = 324$  В.

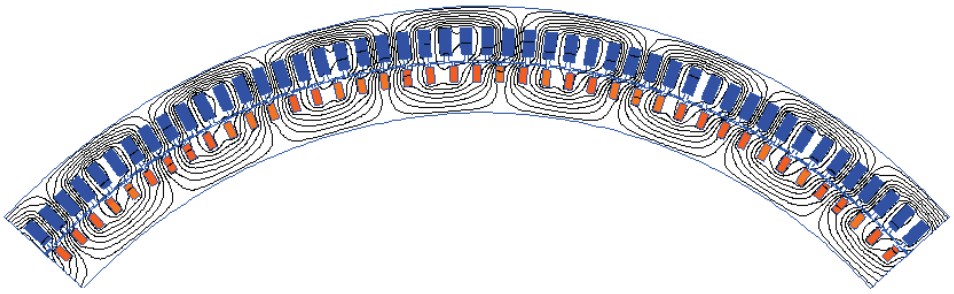


Рис. 2. Картина поля в поперечном сечении тягового АД мощностью 60 кВт для номинального режима

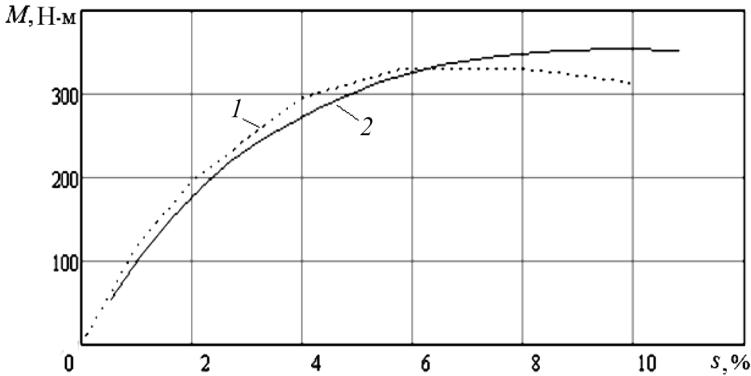
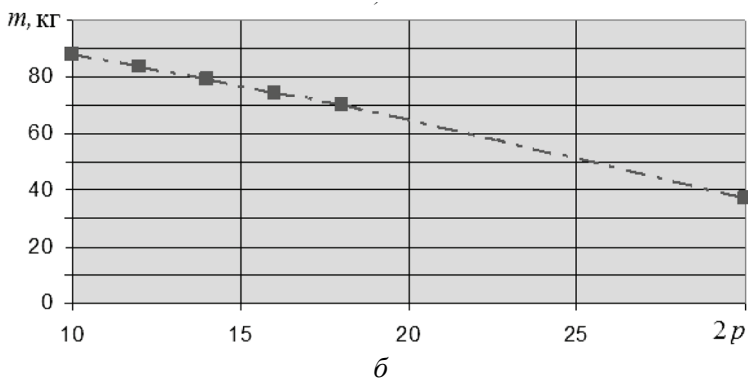
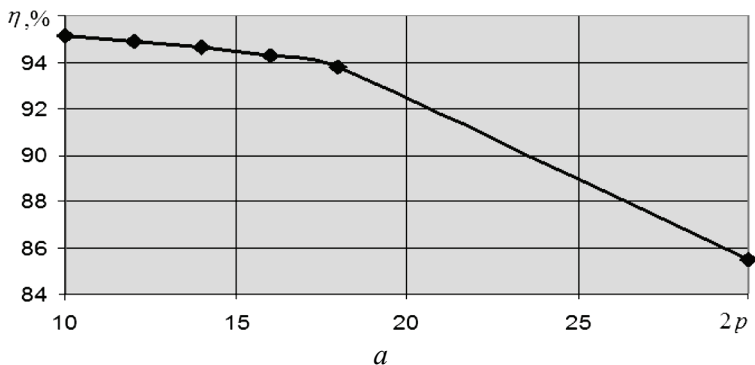


Рис. 3. Механические характеристики тягового АД мощностью 60 кВт при  $2p = 30$  и  $f_n = 500$  Гц, полученные на основе численного расчета поля (1) и классическим методом (2)

По результатам выполненных расчетов электромагнитного поля определены электрические и магнитные потери в двигателе, согласно которым КПД в номинальном режиме  $\eta_n = 86,5$  % (против заявленного опытного КПД 87 %). Отметим, что КПД общепромышленного АД серии 4А такой же мощности и частоты вращения составляет около 92 %.

Дальнейший анализ влияния числа пар полюсов на показатели тягового АД при сохранении заданных габаритов показал, что наиболее эффективным двигатель будет при  $2p = 18$ . На рис. 4 приведены зависимости КПД и массы активных материалов от числа полюсов тягового АД.

Таким образом, расчеты показали, что исходный тяговый АД является далеко не оптимальным. Вследствие высокой частоты питания в АД возникают завышенные добавочные электрические и магнитные потери, для снижения которых необходимо в 2 раза уменьшить число полюсов и соответственно частоту напряжения питания. Кроме того, установлено, что для получения требуемой тяговой характеристики наиболее приемлемым является АД с  $2p = 18$ .



**Рис. 4. Зависимости КПД (а) и массы (б) активных материалов от числа полюсов  $2p$**

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Универсальный метод расчета электромагнитных процессов в электрических машинах / А.В. Иванов-Смоленский, Ю.В. Абрамкин, А.И. Власов, В.А. Кузнецов; под ред. А.В. Иванова-Смоленского. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 216 с.
2. Проектирование электрических машин: учеб. для вузов / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев; под ред. И.П. Копылова. — 3-е изд., испр. и доп. — М.: Высш. шк., 2002. — 757 с.

Статья поступила в редакцию 05.10.2012