

УДК 621.313

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ЯКОРЯ ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

**Ю.В. Зубков, В.Е. Верецагин\***

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: zub577@mail.ru

**Аннотация.** Электрический привод широко распространен в практике автомобилестроения. Его основой является электрический тяговый двигатель (ТД), который по сравнению с двигателем внутреннего сгорания (ДВС) имеет такие преимущества, как высокий КПД, большая перегрузочная способность, широкий диапазон регулирования частоты вращения, возможность непосредственной передачи момента на ведущие колеса. Основными требованиями к тяговому двигателю являются высокая эффективность во всем диапазоне нагрузок, простота регулирования скорости и крутящего момента, высокая перегрузочная способность, малые масса и габариты, способность к рекуперативному торможению, широкий диапазон регулирования частоты вращения, простота и удобство обслуживания. Наибольшее распространение в качестве тяговых двигателей нашли синхронные электрические машины с возбуждением от постоянных магнитов (ПМ). Они отличаются высокой плотностью крутящего момента, эффективностью и постоянством мощности в широком диапазоне изменения частот вращения. Однако существует ряд проблем, сдерживающих внедрение этих электрических машин в тяговый привод отечественных автомобилей, одной из которых является отсутствие методики выбора конструкции якоря и индуктора на стадии расчета основных размеров ТД с магнитоэлектрическим возбуждением с учетом многообразия схем и способов исполнения обмотки, размещения ПМ в индукторе. В статье изложены вопросы выбора электромагнитных нагрузок при различных способах охлаждения, величины немагнитного зазора, предложен алгоритм электромагнитного расчета по максимальному моменту, содержащий ряд уточняющих циклов. Значения индуктивностей и коэффициентов проектирования определяются при численном моделировании магнитного поля. Рассмотрены особенности конструктивного и схемного исполнения активной зоны и обмотки якоря. Получены кривые распределения магнитодвижущих сил распределенной и сосредоточенной обмоток, сделан их гармонический анализ, даны рекомендации по конфигурации активной зоны якоря ТД.

**Ключевые слова:** тяговый двигатель, постоянные магниты, проектирование, обмотка якоря

### Введение

Борьба с загрязнением окружающей среды и циклически повторяющийся энергетический мировой кризис привели к скачкообразному развитию тягового электропривода, преимущественно в области легковых транспортных средств

---

\* Зубков Юрий Валентинович, доктор технических наук, профессор.  
Верецагин Владислав Евгеньевич, старший преподаватель.

(ТС). Автомобили с полностью электрической или гибридной силовой установкой являются более экологически безопасными по сравнению с ТС на двигателе внутреннего сгорания (ДВС), а эффективность применения электрической тяги для передвижения не вызывает сомнений.

Основой электропривода ТС является электрический тяговый двигатель (ТД), который имеет неоспоримые преимущества по сравнению с ДВС: высокий КПД, большую перегрузочную способность, широкий диапазон регулирования частоты вращения, возможность реализации прямого привода колес. Тип этого двигателя определяется на начальном этапе создания электромобиля. Основными требованиями к тяговому двигателю являются: высокая эффективность во всем диапазоне нагрузок; простота регулирования скорости и крутящего момента; высокая перегрузочная способность; малые масса и габариты; способность к рекуперативному торможению; широкий диапазон регулирования частоты вращения; простота и удобство обслуживания [1, 2]. Кроме того, важным фактором является его стоимость.

Помимо перечисленного от ТД требуется соответствие его характеристик всем возможным режимам движения ТС, которые условно можно разделить на следующие [3, 4]:

1. ТД должен обеспечивать постоянный момент до определенной частоты вращения, называемой «базовой скоростью». Обычно эта скорость лимитируется величиной выходного напряжения инвертора. На низкой частоте вращения требуется более высокий крутящий момент, так как чем больше постоянный крутящий момент, тем выше ускорение ТС. Это область постоянного момента.

2. Диапазон скоростей, в котором ТД должен обеспечивать постоянную мощность. Когда скорость доходит до «базовой», напряжение и ток инвертора достигают максимальных значений. При этом инвертор не в состоянии обеспечить дальнейший рост мощности ТД, поэтому данный диапазон называется областью постоянной мощности.

3. При увеличении скорости выше «базовой» происходит уменьшение крутящего момента ТД. Это область, где скорость ТС быстро растет, а мощность ТД не может оставаться постоянной, поэтому инвертор снижает ток силовой обмотки ТД.

В качестве тяговых двигателей в ТС принципиально возможно использование электромеханических преобразователей постоянного и переменного тока. В мировой практике электроавтомобилестроения наибольшее распространение получили IPM (insert permanent magnet) – синхронные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов (ПМ). Они широко используются в гибридных автомобилях и электромобилях благодаря присущим им достоинствам, в том числе высокой плотности крутящего момента, эффективности и постоянству мощности в широком диапазоне изменения частот вращения [5, 6]. Благодаря конструктивной анизотропии индуктора (проводимость магнитного потока по осям  $d$  и  $q$  различна) IPM машины имеют более высокую плотность крутящего момента, чем другие электромеханические преобразователи. Правильно спроектированный двигатель может обеспечить хорошее ослабление потока и возможность перегрузки без негативных последствий.

Большое число научных публикаций и растущий интерес фирм-производителей тягового электрооборудования в Российской Федерации к возможности его практической реализации свидетельствует о перспективности данного научного направления. При этом ряд вопросов, связанных с проектированием

ем и оптимизацией тяговых электрических двигателей, остаются нерешенными. В частности, отсутствует методика выбора конструкции якоря и индуктора на стадии расчета основных размеров ТД с магнитоэлектрическим возбуждением с учетом многообразия схем и способов исполнения обмотки, размещения ПМ в индукторе. Разработка методики определения размеров активной зоны двигателя и выбора типа обмотки является насущной задачей. В данной статье делается такая попытка. Электромеханический преобразователь с постоянными магнитами в гибридном ТС работает как двигатель в стандартном цикле движения или как генератор в период торможения и распределения мощности по бортовым системам. Базовый режим работы – двигательный, поэтому подход к разработке и созданию тягового ЭМП – как к проектированию двигателя.

### **Входные параметры электромагнитного расчета и границы их изменения**

В техническом задании на проектирование ТД оговариваются величина пускового момента и диапазон рабочих скоростей ТС. Нагрузка тягового двигателя постоянно меняется при изменении режимов движения ТС. Зная скоростной профиль автомобиля (рис. 1), передаточное отношение главной передачи и диаметр колеса ТС, можно определить вращающий момент, который принимается за максимальный.

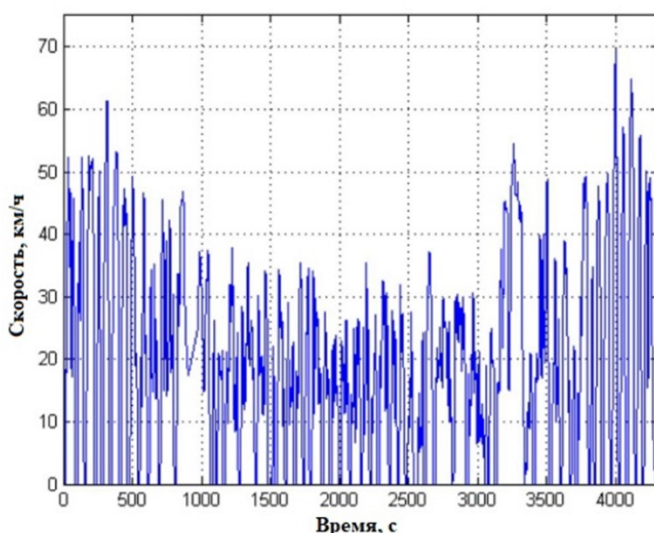


Рис. 1. Скоростной профиль автомобиля малой грузоподъемности в городском цикле

Из этих же данных находится среднее значение момента за рабочий цикл. При номинальной (базовой) частоте вращения этот момент соответствует выходной мощности. Тяговый двигатель обычно должен обеспечивать кратность пускового момента не менее 2...3 [7]. В нашем случае при среднем моменте 500 Нм и максимальном моменте 1700 Нм кратность пускового момента составляет 3, 4.

Напряжение преобразователя принято 400 В, номинальная (базовая) частота вращения двигателя 1500 об/мин. Уровень мощности и напряжения силового электронного блока обычно определяет максимально допустимый ток инвертора. Перегрузка бортового накопителя энергии ограничивает мощность и тем самым

снижает максимальный ток. Таким образом, максимальный допустимый ток также является одним из параметров задания.

Электромагнитный момент может быть выражен через амплитуду радиальной составляющей индукции поля возбуждения  $B_{0m}$ , линейную плотность поверхностного тока (линейную нагрузку)  $A$  и угол между амплитудами этих волн индукции и линейной нагрузки  $\beta$ :

$$M = \pi R^2 l_\delta B_{0m} A \cdot \cos \beta,$$

где  $R$  – радиус расточки статора;  $l_\delta$  – длина зазора.

Амплитуды линейной нагрузки и индукции, выраженные через ток в силовой обмотке  $I_1$  и магнитный поток  $\Phi_m$ :

$$A = \frac{\sqrt{2} m I_1 w k_{об}}{\tau \cdot p}; \quad B_{0m} = \frac{\pi \Phi_m}{2 \tau \cdot l_\delta},$$

где  $m$  – число фаз;  $w k_{об}$  – число эффективных витков фазы обмотки;  $\tau$  – полюсное деление;  $p$  – число пар полюсов.

Тогда выражение для вращающего момента

$$M = \frac{p m}{\sqrt{2}} \cdot \Psi_{10m} I_1 \sin \psi.$$

Здесь  $\Psi_{10m} = w k_{об} \Phi_m$  – потокосцепление с фазой обмотки;  $\psi = \beta + \frac{\pi}{2}$  – угол между векторами потокосцепления (ЭДС холостого хода) и тока.

Значения линейной нагрузки выбираются с учетом способа охлаждения. С целью уменьшения массогабаритных показателей ТД может быть рекомендовано жидкостное охлаждение, которое допускает для мощностей 80...110 кВт на частотах вращения 1500...2500 об/мин величину линейной нагрузки 90...150 кА/м и плотности тока в обмотке 4...6 А/мм<sup>2</sup>. При выборе линейной нагрузки и плотности тока следует учитывать тип обмотки. Зубцовые обмотки допускают большие значения данных параметров по сравнению с распределенными за счет коротких лобовых частей, меньших электрических потерь, лучших условий теплоотдачи от наиболее нагретых частей обмотки. Для зубцовых обмоток рекомендуется плотность тока до 7 А/мм<sup>2</sup>. В области низких частот вращения допускается превышение указанных значений до 2...3 раз, однако данный переходный процесс характерен для разгона тягового привода и длится несколько секунд, поэтому не оказывает сколь-нибудь значимого влияния на температурное состояние ТД.

### Алгоритм проектирования тягового двигателя

В процессе проектирования имеется большое число независимых параметров, которые необходимо определить для достижения конечного результата в виде проекта. Некоторые параметры устанавливаются требованиями эксплуатации, например величина напряжения. Алгоритм проектирования состоит из нескольких основных этапов:

- определение главных размеров ТД;
- выбор типа обмотки и конфигурации активной зоны якоря;
- расчет индуктора и определение объема ПМ;
- контроль механической прочности вращающейся части ТД.

На рис. 2 показана блок-схема алгоритма проектирования тягового двигателя.



Рис. 2. Блок-схема алгоритма проектирования ТД по максимальному моменту

В качестве ограничения целесообразно использовать внешний диаметр статора, выбираемый с учетом свободного пространства на борту ТС. Длина активной части в процессе проектирования должна обеспечить требуемые момент или индуктивность. Выходным критерием является величина электромагнитного момента ТД, который он развивает в найденных габаритах. Момент двигателя может быть определен как

$$M = \frac{mp}{4\pi^2 n^2} \left( \frac{U \cdot E_0}{L_d} \sin \theta + \frac{U^2 (L_d - L_q)}{2L_d L_q} \sin 2\theta \right), \quad (1)$$

где  $n$  – частота вращения;  $U$  – фазное напряжение;  $L_d$ ,  $L_q$  – индуктивности обмотки статора по продольной и поперечной осям соответственно;  $\theta$  – угол нагрузки.

Синхронная индуктивность по продольной оси

$$L_d = \frac{2m\mu_0}{\pi^2} \cdot \frac{\tau}{p \cdot \delta k_\delta k_\mu} l \cdot (k_{об} w)^2 k_{ad}, \quad (2)$$

$\delta k_\delta k_\mu$  – эффективный зазор с учетом зубчатости статора и насыщения магнитопровода;  $k_{ad}$  – коэффициент формы поля продольной реакции якоря.

Из (1) и (2) следует, что максимальный момент, который может обеспечить двигатель при определенном максимальном токе, можно увеличить за счет роста числа эффективных витков обмотки при сохранении тока инвертора. Это приводит к увеличению как линейной токовой нагрузки, так и синхронной индуктив-

ности, что, в свою очередь, влияет на способность к ослаблению поля и изменению диапазона регулирования частоты вращения ТД. Другой способ воздействия на величину момента и регулировочную способность – изменение коэффициентов формы поля продольной и поперечной реакции якоря, что в ИРМ машине достигается выбором соответствующей конструкции индуктора и расположения в нем ПМ.

В соответствии с предложенным алгоритмом на начальном этапе выбирают следующие параметры: бортовое напряжение шины постоянного тока, номинальная частота вращения ТД, число полюсов с учетом частоты перемагничивания на верхнем пределе скорости и величины удельных магнитных потерь на этой частоте. Далее по внешнему диаметру ТД, выбранной системе охлаждения, моменту определяется длина активной части с учетом отношения диаметра ротора к его внешнему диаметру  $k_D$ :

$$l_\delta = \frac{2k_e M_n}{\pi \alpha_\delta k_B k_{ob} AB_\delta \cdot (D_n k_D)^2 \eta \cos \varphi}, \quad (3)$$

где  $k_e$  – коэффициент ЭДС, учитывающий внутреннее падение напряжения в обмотке якоря при номинальной нагрузке;  $\alpha_\delta$  – расчетный коэффициент полюсного перекрытия;  $k_B$  – коэффициент формы кривой ЭДС;  $k_{ob}$  – обмоточный коэффициент.

Расчетные коэффициенты полюсного перекрытия и формы ЭДС были определены для выбранной конфигурации ИРМ индуктора при численном моделировании магнитного поля ТД в нагрузочном режиме работы при различных значениях конструктивного коэффициента полюсного перекрытия  $\alpha$  [8]. На рис. 3, 4 показано поперечное сечение прототипа ТД с ИРМ индуктором и зависимости указанных коэффициентов от величины полюсного перекрытия. Моделирование магнитного поля проводилось при неизменном объеме ПМ и величине немагнитного зазора.

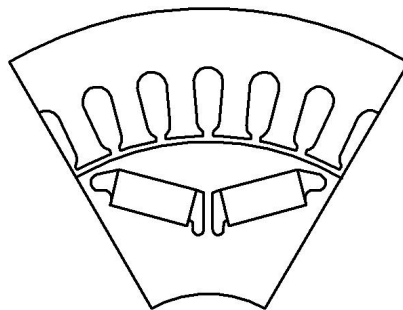


Рис. 3. Фрагмент поперечного сечения ТД

Отдельно следует остановиться на выборе величины зазора. Чем меньше воздушный зазор, тем меньше пусковой ток при асинхронном пуске двигателя. С другой стороны, влияние реакции якоря и тормозной момент увеличиваются по мере того, как зазор уменьшается. При использовании высококоэрцитивных ПМ увеличение размагничивающего действия реакции якоря при уменьшении зазора не является критичным. Зазор в ТД может варьироваться от долей мм до 4...6 мм в зависимости от частоты вращения. На выбор зазора влияют и требова-

ния по допустимой величине эксцентриситета ротора, обеспечению достаточной прочности конструкции машины в целом. Использование бандажной гильзы для фиксации ПМ на роторе в конструкции с SPM (поверхностное расположение ПМ) индуктором предполагает увеличение немагнитного зазора между статором и ротором на толщину гильзы.

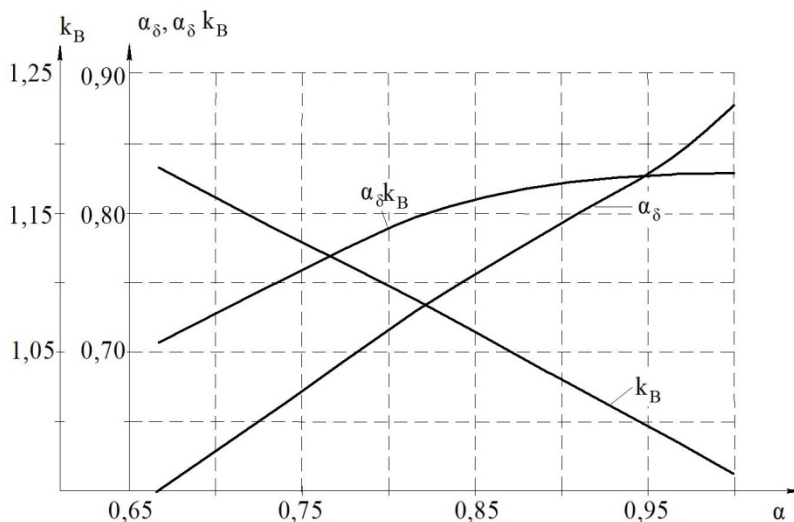


Рис. 4. Зависимости расчетных коэффициентов поля от величины полюсного перекрытия

Финальные рекомендации по электрическим, магнитным нагрузкам и величине немагнитного зазора для ТД мощностью 60...120 кВт на базе СМ с инкорпорированными магнитами можно сформулировать так:

- линейная нагрузка при воздушном охлаждении 60...90 кА/м, при жидкостном охлаждении в зависимости от теплоносителя и схемы отвода тепла 90...150 кА/м;

- плотность тока в силовой обмотке  $4...6 \text{ А/мм}^2$  для распределенных обмоток, до  $7 \text{ А/мм}^2$  для зубцовых обмоток за счет меньшей длины лобовых частей и меньшего тепловыделения в обмотке;

- максимальная индукция в зазоре зависит от способа размещения ПМ в индукторе, для *IPM* машин с *V*-образной конфигурацией магнитов 0,5...0,7 Тл. Большие значения соответствуют большому объему и магнитной энергии ПМ;

- немагнитный зазор в зависимости от марки ПМ (величин коэрцитивной силы  $H_c$  и остаточной индукции  $B_r$ ) 0,8... 1,5 мм.

### Зубцовая зона и конструкция обмоток ТД

После определения основных размеров проектируется зубцовая зона и сердечник статора в целом. Здесь следует принимать во внимание необходимость размещения большой токовой нагрузки на ограниченном диаметре, который, как было сказано выше, связан с особенностями компоновки ТД в свободном пространстве транспортного средства. Обмотка якоря может быть распределенной (РО) или сосредоточенной (СО).

Распределенные многофазные обмотки хорошо известны [9, 10]. Традиционно их сильными сторонами являются: отлаженная технология, возможность укорочения шага и распределения (улучшения гармонического состава МДС), высокий обмоточный коэффициент для основной гармоники поля, эффективная борьба с зубцовыми гармониками путем скоса пазов, выполнения полюсов в виде шеврона, проточек в коронках зубцов и т. д. Однако при выполнении распределенной обмотки пазы получаются узкими и глубокими. Обмотка, расположенная в таких пазах, имеет повышенное индуктивное сопротивление рассеяния за счет увеличенной проводимости пазового рассеяния. Данное обстоятельство приводит к росту коэффициента ЭДС  $k_e$ , входящего в формулу (3), и увеличению габаритов ТД. За счет длинных лобовых частей увеличены электрические потери в обмотке, а большой их вылет вынуждает увеличивать конструктивную длину машины и, как следствие, ее вес. Укладка РО, особенно двухслойной, труднее поддается автоматизации, что увеличивает стоимость обмоточных работ и ТД в целом.

Для преодоления указанных недостатков применяются концентрические сосредоточенные обмотки [11], в том числе и в тяговых двигателях [12]. На рис. 5 показан фрагмент якоря с распределенной и сосредоточенной обмотками.

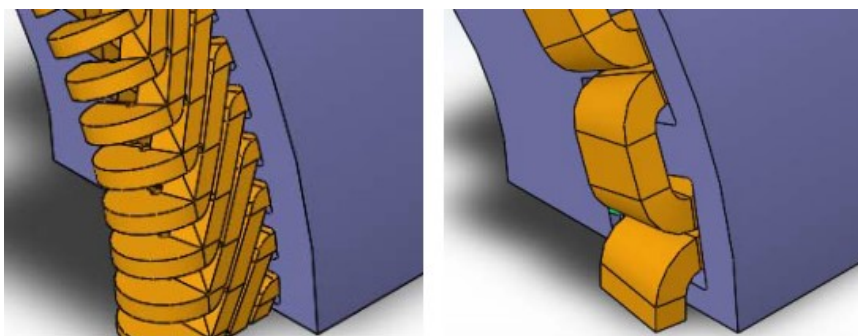


Рис. 5. Якорь с распределенной и сосредоточенной обмотками

Сосредоточенная концентрическая обмотка, также называемая зубцовой, имеет меньшие вылет и длину лобовых частей. Лобовые части секций такой обмотки, относящиеся к разным пазам и фазам, не перекрещиваются, что существенно снижает требования к электрической прочности изоляции и позволяет увеличить коэффициент заполнения паза обмоточным материалом. У распределенной обмотки витки в лобовых частях перекрещиваются, и их сложнее изолировать. Для ТД с сосредоточенной обмоткой характерны меньшие высота, масса ярма и сердечника якоря благодаря меньшей величине магнитной индукции на этом участке магнитопровода. В ТД с СО существует возможность увеличения линейной нагрузки за счет сокращения числа пазов. Они имеют меньшую осевую длину за счет компактных лобовых частей и больший коэффициент заполнения паза из-за меньшей площади корпусной изоляции. Наконец, отсутствие пересечений катушек разных фаз снижает до минимума возможность возникновения межфазного короткого замыкания, а высокое значение индуктивности рассеяния способствует уменьшению тока установившегося короткого замыкания.



## Анализ магнитодвижущей силы распределенной и сосредоточенной обмоток

Сосредоточенная обмотка имеет ограничения по комбинации чисел полюсов и пазов. Согласно теории обмоток переменного тока число пазов на полюс и фазу  $q$  может быть найдено как

$$q = \frac{Z}{2pt},$$

где  $Z$  – полное число пазов;  $t$  – число фаз.

У распределенных обмоток шаг выбирается близким к произведению  $mq$ , и в большинстве случаев  $q$  – целое число. Сосредоточенная обмотка имеет шаг  $y=1$  и дробное  $q$ . Для сравнения обоих типов обмоток сделаем допущение о неизменной топологии ротора и равенстве числа полюсов ( $2p=6$ ). Распределенная обмотка расположена в 36 пазах и выполнена с  $q=2$ . Для сосредоточенной обмотки из-за ограничения по ширине катушки число пазов выбрано  $Z=9$  и  $q=1/2$ .

Важные характеристики ТД, такие как индукция в воздушном зазоре, электромагнитный момент и его пульсации, магнитные радиальные силы, напрямую связаны с распределением магнитодвижущей силы (МДС) обмотки. На рис. 6 показана МДС распределенной обмотки.

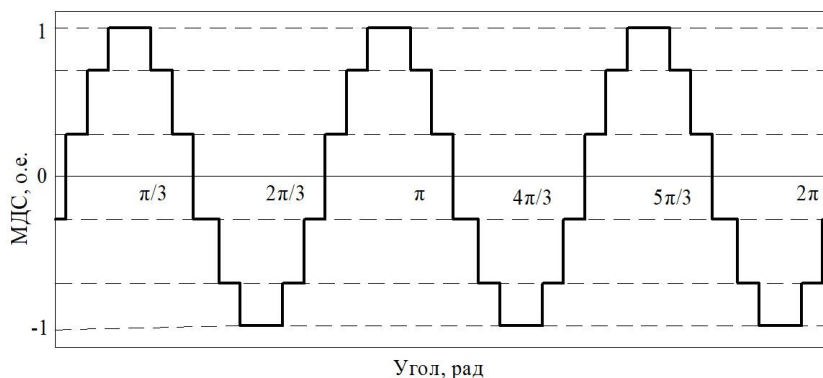


Рис. 6. МДС распределенной обмотки

Обмотка создает симметричную вращающуюся волну МДС, первая гармоника которой взаимодействует с основным потоком постоянных магнитов и создает электромагнитный момент. Амплитуда высших (нечетных) гармоник незначительна, поэтому распределение поля в зазоре близко к синусоидальному. Разложение МДС в ряд Фурье определяется следующим уравнением:

$$F(x, t) = \sum_v \frac{m w k_{o\delta v}}{\pi v} \cdot I_m \cos\left(\omega t - \frac{\pi v}{\tau} \cdot x + \theta\right), \quad (4)$$

где  $m$  – число фаз;  $w$  – число витков в фазе;  $v$  – номер гармоники;  $I_m$  – амплитуда тока;  $\omega$  – угловая частота;  $\tau$  – полюсное деление;  $k_{o\delta v}$  – обмоточный коэффициент для  $v$ -й гармоники.

Обмоточный коэффициент распределенной обмотки

$$k_{обv} = k_{yv} \cdot k_{pv} = \sin\left(\frac{v \cdot 5\pi}{12}\right) \cdot \frac{\sin\left(\frac{v\pi}{6}\right)}{2\sin\left(\frac{v\pi}{12}\right)},$$

где  $k_{yv}$ ,  $k_{pv}$  – коэффициенты укорочения и распределения соответственно.

МДС сосредоточенной обмотки можно также разложить в ряд Фурье по выражению (4) с учетом значения обмоточного коэффициента для гармонических составляющих  $k_{обv} = \sin\left(\frac{v\pi}{3}\right)$ . МДС такой обмотки показана на рис. 7.

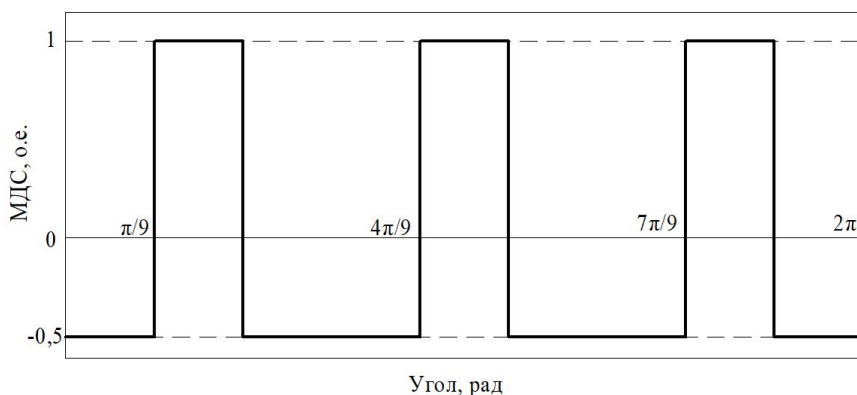


Рис. 7. МДС сосредоточенной обмотки

В спектре помимо основной присутствуют высшие гармоники с относительно большой амплитудой, в том числе четные. Это обуславливает возрастание добавочных потерь, пульсаций момента в двигателе с такой обмоткой.

По результатам проведенных исследований и предложенному алгоритму был спроектирован и изготовлен тяговый двигатель для автомобиля малой грузоподъемности. Испытания опытного образца ТД с распределенной обмоткой якоря подтвердили правильность теоретических положений, лежащих в основе методики электромагнитного расчета.

### Заключение

1. Определены базовые параметры электромагнитного расчета ТД и границы их изменения в процессе проектирования, составлен алгоритм проектирования по критерию величины электромагнитного момента.

2. В результате решения ряда задач расчета магнитного поля найдены коэффициенты формы ЭДС и полюсного перекрытия и определена их зависимость от относительной величины полюсной дуги. Приемлемые значения конструктивного коэффициента полюсного перекрытия составляют 0,8...0,9.

3. Осуществлен анализ МДС распределенной и сосредоточенной обмоток якоря двигателя на предмет содержания высших пространственных гармоник. Установлено, что распределенная обмотка имеет более высокий обмоточный коэффициент в поле основной гармоники и низкое содержание высших гармониче-

ских в кривой МДС, поэтому может быть рекомендована для использования в тяговых двигателях.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Jose C.P., Meikandasivam S.A. Review on the Trends and Developments in Hybrid Electric Vehicles // In Innovative Design and Development Practices in Aerospace and Automotive Engineering. Singapore. 2017. Pp. 211–229.
2. Boldea I., Nasar S.A. Electric drives // Boca Raton: CRC Press, 1999. 411 p.
3. Анучин А.С., Алямки, Д.И., Козаченко В.Ф., Лашкевич М.М., Остриров В.Н. Направления развития и оптимизации систем электроприводов городского гибридного и электрического транспорта // Электротехника. Знак. 2015. № 1. С. 5–9.
4. Слепцов М.А. Основы электротранспорта. М.: Академия, 2006.
5. Wang Y., Bianchi N., Bolognani S., Alberti L. Synchronous Motors for Traction Applications // 2017 Int. Conf. of Electrical and Electronic Technologies for Automotive. DOI: 10.23919/EETA.2017.7993210.
6. Макаричев Ю.А., Зубков Ю.В., Верецагин В.Е., Владимиров Д.А. Магнитоэлектрический двигатель-генератор автономного мобильного объекта // Электроэнергия. Передача и распределение. № 3(66). 2021. С. 118–127.
7. Patil M.S., Dhamal S.S., Wagh K.K. A Detailed Motor Selection for Electric Vehicle Traction System // Proc. of the Third Int. Conf. on I-SMAC, 2019. Pp. 679–684.
8. Макаричев Ю.А., Зубков Ю.В., Иванников Ю.Н., Гуляев И.В. Анализ характеристик электромеханического стартера газотурбинной установки // Электротехника. 2019. № 7. С. 24–32.
9. Bukšnaitis J. Estimation of Winding Factors of Two-layer Three-phase Fractional Windings // Elektronika and Elektrotechnika, 2009. № 8(96). Pp. 23–26.
10. Жерве Г.К. Обмотки электрических машин. Л.: Энергоатомиздат, 1989. 400 с.
11. Беспалов В.Я., Коварский М.Е., Сидоров А.О. Исследование пульсаций электромагнитного момента синхронных машин с постоянными магнитами с целым и дробным значениями  $q$  // Электричество. 2018. № 5. С. 45–52.
12. Захаренко А.Б. Создание высокомоментных электрических машин с постоянными магнитами: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.01. М.: МЭИ, 2008. 42 с.
13. Зубков Ю.В., Кауров С.Ю., Верецагин В.Е. Исследование работы интегрированного стартер-генератора при запуске двигателя внутреннего сгорания // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. 2020. № 3(67). С. 125–138.
14. Анучин А.С. Разработка цифровых систем эффективного управления комплектов тягового электрооборудования гибридных электрических транспортных средств: Дис. ... докт. техн. наук. МЭИ, 2018. 445 с.
15. Бербиренков И.А., Лохнин В.В. Тяговые двигатели на постоянных магнитах в электроприводе автомобиля // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2011. № 2. Т. 7. С. 10–12.
16. Gerada D., Xu Z., Huang Xu, Gerada Ch. Fully-integrated high-speed IM for improving high-power marine engines // IET Electric Power Applications. 2019. V.13. Iss. 2. Pp. 148–153.

Статья поступила в редакцию 9 сентября 2022 г.

# DESIGNING OF TRACTION MOTOR STATORS CORE

**Yu.V. Zubkov, V.E. Vereshagin\***

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: zub577@mail.ru

**Abstract.** *Electric drive is widely used in automotive practice. Its basis is an electric traction motor (TM), which, compared with an internal combustion engine (ICE), has such advantages as high efficiency, high overload capacity, a wide range of speed control, and the possibility of torque direct transmission to the drive wheels. The main requirements for a traction motor are high efficiency over the entire load range, ease of speed and torque control, high overload capacity, small weight and dimensions, regenerative braking capability, wide speed control range, simplicity and ease of maintenance. The most widely used as traction motors are synchronous electric machines with excitation from permanent magnets (PM). They are characterized by high torque density, efficiency and power consistency over a wide speed range. However, there are a number of problems that hinder the introduction of these electric machines in the traction drive of home cars, one of which is the lack of a methodology for choosing the design of an armature and an inductor at the stage of calculating the main dimensions of an TM with magnetoelectric excitation, taking into account the variety of schemes and methods of winding, PM placement in the inductor. The article deals with the issues of choosing electromagnetic loads for various cooling methods, the size of the non-magnetic gap, an algorithm for electromagnetic calculation based on the maximum torque, containing a number of refining cycles, is proposed. The values of inductances and design factors are determined by numerical simulation of the magnetic field. The features of the design and circuit design of the core and armature winding are considered. Distribution curves of magnetomotive forces of distributed and concentrated windings are obtained, their harmonic analysis is made, recommendations are given on the configuration of the TD armature active zone.*

**Keywords:** *traction motor, permanent magnets, design, armature winding*

## REFERENCES

1. Jose C.P., Meikandasivam S.A. Review on the Trends and Developments in Hybrid Electric Vehicles // In Innovative Design and Development Practices in Aerospace and Automotive Engineering. Singapore. 2017. Pp. 211–229.
2. Boldea I., Nasar S.A. Electric drives // Boca Raton: CRC Press, 1999. 411 p.
3. Anuchin A.S., Alyamkin D.I., Kozachenko V.F., Lashkevich M.M., Ostrirov V.N. Directions for the development and optimization of electric drive systems for urban hybrid and electric transport // Elektrotechnika. Znack. 2015. No. 1. Pp. 5–9.
4. Sleptsov M.A. Osnovy elektricheskogo transporta [Fundamentals of electric transport]. M.: Akademiya, 2006. 465 pp.
5. Wang Y., Bianchi N., Bolognani S., Alberti L. Synchronous Motors for Traction Applications // 2017 Int. Conf. of Electrical and Electronic Technologies for Automotive. DOI: 10.23919/EETA.2017.7993210.
6. Makarichev Yu.A., Zubkov Yu.V., Vereshagin V.E., Vladimirov D.A. Magnetoelectric motor-generator of an autonomous mobile object // Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie. No. 3(66). 2021. Pp. 118–127.

---

\* Yuri V. Zubkov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.  
Vladislav E. Vereshagin, Postgraduate Student.

7. *Patil M.S., Dhamal S.S., Wagh K.K.* A Detailed Motor Selection for Electric Vehicle Traction System // Proc. of the Third Int. Conf. on I-SMAC. 2019. Pp. 679–684.
8. *Makarichev Yu.A., Zubkov Yu.V., Ivannikov Yu.N., Gulyaev I.V.* Analysis of the Characteristics of an Electromechanical Starter in a Gas Turbine Plant // Russian Electrical Engineering. 2019. No. 7. Pp. 24–32.
9. *Bukšnaitis J.* Estimation of Winding Factors of Two-layer Three-phase Fractional Windings // Elektronika and Elektrotechnika. 2009. No. 8(96). Pp. 23–26.
10. *Gerve G.K.* Obmotki elektricheskikh mashin [Windings of electrical machines]. Leningrad: Energoatomizdat, 1989. 400 p.
11. *Bespalov V.Ya., Kovarskiy M.E., Sidorov A.O.* Investigation of electromagnetic torque pulsations of synchronous machines with permanent magnets with integer and fractional  $q$  values // Elektrichestvo. 2018. No. 5. Pp. 45–52.
12. *Zaharenko A.B.* Sozдание visokomomentnykh elektricheskikh mashin s postoyannymi magnitami: Diss. ... dokt. tech. nauk. Moscow, MEI, 2008. 42 p.
13. *Zubkov Yu.V., Kaurov S.Yu., Vereshagin V.E.* Study of the operation of an integrated starter-generator when starting an internal combustion engine // Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Un-ta. Ser. Tekhn. Nauki. 2020. No. 3(67). Pp. 125–138.
14. *Anuchin A.S.* Razrabotka tsifrovyykh sistem effektivnogo upravleniya komplektov tyagovogo elektrooborudovaniya gibridnykh elektricheskikh transportnykh sredstv: Diss. ... dokt. tech. nauk. Moscow, MEI, 2018. 445 p.
15. *Berbirenkov I.A., Lohnin V.V.* Traction motors with permanent magnets in the electric drive of a car // Elek. i inform. kompl. i sist. 2011. Vol. 7, No. 2. Pp. 10–12.
16. *Gerada D., Xu Z., Huang Xu, Gerada Ch.* Fully-integrated high-speed IM for improving high-power marine engines // IET Electric Power Applications. 2019. V. 13, Iss. 2. Pp. 148–153.