

УДК 621.313.17

В. В. ГРЕБЕНИКОВ, М. В. ПРЬЙМАК**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОБУСА**

Приведены результаты численного исследования влияния количества и высоты пазов статора, а также конфигурации постоянных магнитов в роторе на характеристики электродвигателей для городского электробуса. Показано, что при неизменных габаритных размерах электродвигателя путем увеличения высоты пазов статора и жидкостного охлаждения можно повысить электромагнитный момент и мощность электродвигателя. Выполнен расчет рабочих характеристик в программном пакете Infolytica MotorSolve, тепловой расчет выполнен в пакете Comsol.

Ключевые слова: постоянные магниты, высота паза статора, электромагнитный момент, рабочие характеристики, температура обмоток.

Наведено результати чисельного дослідження впливу кількості та висоти пазів статора, а також конфігурації постійних магнітів в роторі на характеристики електродвигунів для міського електробуса. Показано, що при незмінних габаритних розмірах електродвигуна шляхом збільшення висоти пазів статора і рідинного охолодження можна підвищити електромагнітний момент і потужність електродвигуна. Виконано розрахунок робочих характеристик в програмному пакеті Infolytica MotorSolve, тепловий розрахунок виконаний в пакеті Comsol.

Ключові слова: постійні магніти, висота паза статора, електромагнітний момент, робочі характеристики, температура обмоток.

The numerical investigation results of the influence of the number and the height of stator slots, as well as the configuration of the permanent magnets in the rotor on the characteristics of electric motors for urban electric bus are presented. It is shown, that at constant overall dimensions of the motor, the electromagnetic torque and motor power can be significantly improved by increasing of the stator slots height and liquid cooling. The optimum height of stator slots is found, at which the maximum electromagnetic torque and motor power at the set restrictions: induction in the magnetic circuit elements, the minimum diameter of the rotor provided its mechanical strength. To analyze the thermal state of electric motor models for operating with overload (at a current density of more than $J = 5 \text{ A/mm}^2$) a three-dimensional model of the electric motor sector is created. It is equal to one pole pitch, which takes into account the heat exchange processes not only in the volume of the electric motor, but in the system of liquid cooling. The simulation of electric motors with a different configuration of the magnetic system determined that the configuration with increased height of the groove and tangential magnetization of the magnets has the highest electromagnetic torque. This motor may be used instead of diesel engine for the average capacity bus. The operating characteristics have been calculated by Infolytica MotorSolve software package. Thermal calculation of electric motors with liquid cooling is made by Comsol software package.

Keywords: permanent magnets, height of the stator slot, electromagnetic torque, operating characteristics, temperature of the windings.

Введение. Применение электродвигателя вместо дизельного двигателя в городском автобусе позволяют повысить комфортность для пассажиров за счет уменьшения уровня шума в салоне. Кроме того, отсутствие вредных выбросов, простота технического обслуживания и низкие эксплуатационные расходы делают электробусы наиболее приоритетным видом пассажирского транспорта в условиях современного города. Согласно прогнозам специалистов к 2030 г. будет произведено более 60 млн. электротранспортных средств. Разработкой и исследованием тяговых электродвигателей для транспортных средств занимаются по всему миру более 30 университетов, исследовательских институтов и лабораторий и более 50 производителей разрабатывают и производят новые типы тяговых электродвигателей, при этом уделяется значительное внимание их энергоэффективности [1].

Наряду с чисто электрическим приводом эффективным решением относительно экономии топлива и снижения уровня выброса вредных веществ является применение комбинированной (гибридной) энергетической системы. В последовательной кинематической схеме гибридной энергетической установки, чаще всего используемой в электробусах, двигатель внутреннего сгорания механически сочленен с электрическим генератором, который через

буферную аккумуляторную батарею питает электродвигатель.

В последнее время для электротранспортных средств все чаще применяются электродвигатели с постоянными магнитами (ПМ) на основе редкоземельных элементов, т.к. эти двигатели имеют лучшие удельные показатели по сравнению с другими типами электродвигателей.

Анализ основных достижений. Для достижения лучших удельных показателей электродвигателей с ПМ: удельной мощности $P_{уд}$ (кВт/кг), удельного момента $M_{уд}$ (Нм/кг) разработчики сосредоточены на исследовании различных конфигураций магнитной системы. В настоящее время в основном разрабатываются и применяются электродвигатели с поверхностными магнитами на роторе (SPM motor) и с встроенными – (IPM motor) [1–5]. Также в последнее время появились публикации, посвященные исследованию PMA–SynRM (Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Machine). Каждый из полюсов ротора этих электродвигателей имеет несколько магнитов, разделенных тонким слоем электротехнической стали [6, 7]. Железо ротора в этом случае изготавливается путем штамповки либо лазерной резки электротехнической стали. Перечисленные типы электродвигателей с ПМ имеет свои преимущества и недостатки и при их разработке

© В.В. Гребеников, М.В. Прыймак, 2016

необходимо учитывать условия эксплуатации, назначение и другие требования.

Применительно к электродвигателям для транспорта можно выделить ряд специфических требований: большое значение момента при трогании и малые скорости в момент старта; способность к кратковременным перегрузкам; малое значение «зубцового» момента; большое значение мощности при скоростном движении; характеристика $M=f(n)$ должна содержать горизонтальный участок в заданном диапазоне частоты вращения [1].

Следует отметить, что исследованию влияния высоты пазов статора в сочетании с различной конфигурацией ПМ в роторе применительно электродвигателям для электробуса не уделено достаточно внимания.

Цель исследований. В работе исследовано влияние высоты пазов статора и их количества, конфигурации постоянных магнитов в роторе, а также жидкостного охлаждения на характеристики электродвигателя, используемого для городского электробуса и определена оптимальная высота пазов и геометрия магнитной системы ротора, при которой достигается максимум электромагнитного момента и мощности.

Постановка задачи. Для городских автобусов средней вместимости используется, как правило, дизельные двигатели основные показатели одной из модификаций такого двигателя следующие: мощность – $P = 140$ кВт (155 л.с.) при частоте вращения – $n = 2300$ об/мин; крутящий момент – $M = 680$ Нм при $n = 1200 \div 1700$ об/мин.

Таким образом постановка задачи на разработку электродвигателя для электробуса может быть сформулирована следующим образом. При заданных габаритах активной части электродвигателя (внешний диаметр статора $d_{sc} = 313$ мм, длина активной части сердечника $l_{Fe} = 170$ мм) определить конфигурацию магнитной системы, при которой достигается максимальное значение момента и мощности.

Варьируемые параметры: число пазов статора, высота пазов статора, конфигурация постоянных магнитов в роторе. При этом используются следующие ограничения: масса магнитов одинакова для всех исследуемых моделей; при вариации геометрией магнитной системы магнитная индукция в спинке статора должна быть не выше $B_c = 1,65$ Тл, а в зубцах статора – $B_z = 2$ Тл; минимальное значение наружного диаметра ротора d_r должно быть таковым, чтобы обеспечить заданный электромагнитный момент без механического повреждения вала ротора; жидкостная система охлаждения должна обеспечить охлаждение обмоток до уровня соответствующего классу Н.

Для реализации поставленной цели на первом этапе были исследованы несколько конфигураций магнитной системы, в которых варьировалась высота пазов статора и их количество при неизменной структуре магнитной системы ротора. На рис. 1 приведены две конфигурации магнитной системы.

В электродвигателе М1 размеры статора такие же

как у стандартного асинхронного двигателя АИР180М8 (число пазов статора – $Z = 72$), наружный диаметр статора – $d_{sc} = 313$ мм, внутренний диаметр статора – $d_{si} = 220$ мм, ротор этого электродвигателя имеет восемь полюсов с ПМ тангенциальной намагнитченности; в электродвигателе М2 – статор имеет меньшее количество пазов – $Z = 24$, а их высота существенно больше, наружный диаметр статора – $d_{sc} = 313$ мм, внутренний диаметр статора – $d_{si} = 140$ мм, ротор этого двигателя также имеет восемь полюсов тангенциальной намагнитченности. Масса магнитов во всех исследуемых электродвигателях одинакова и равна $m_{ПМ} = 6.15$ кг, зазор между статором и ротором – $\delta = 1$ мм.

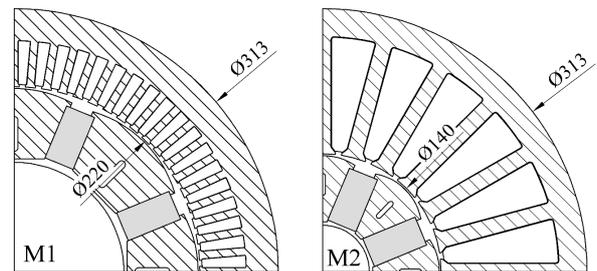


Рис. 1 – Конфигурация магнитной системы электродвигателей М1 и М2

Для уменьшения пульсаций «зубцового» момента в электродвигателях с ПМ и зубцово-пазовым статором применяется либо скос полюсов на роторе на одно зубцовое деление, либо профилирование ферромагнитных полюсов или магнитов, либо закрытие пазов статора с помощью ферромагнитных клиньев с малой проницаемостью [8, 9].

В данных исследованиях применено профилирование. Глубина профилирования – разность между максимальным и минимальным расстоянием от центра ротора до наружной поверхности полюсов. В результате численных исследований установлено, что применение глубины профилирования равной 2 мм приводит к значительному уменьшению пульсаций электромагнитного момента, поэтому для всех исследуемых моделей применялось эта величина глубины профилирования полюсов либо магнитов.

Основные значения массы элементов активной части электродвигателя М1 и М2 приведены в табл. 1. У электродвигателя М2 с высокими пазами масса обмоток статора в 2,78 раза больше, а общая масса активной части больше в 1,24 раза, чем у электродвигателя М1.

Таблица 1 – Основные значения массы элементов электродвигателей М1 и М2

Параметр	М1	М2
Масса железа ротора, кг	20.6	7.9
Масса постоянных магнитов, кг	6.15	6.15
Масса железа статора, кг	34.6	41.3
Масса обмоток статора, кг	13.3	37.0
Общая масса активной части, кг	74.7	92.4

Результаты численного исследования. Так как рабочий диапазон частоты вращения дизельного двигателя, применяемого для городских автобусов средней вместимости, находится в пределах $n = 500 \div 5000$ об/мин, то рабочие характеристики исследуемых электродвигателей также рассчитаны в этом диапазоне.

Расчет рабочих характеристик для всех исследуемых электродвигателей производился в пакете Infolytica MotorSolve при следующих условиях: обмотки статора включены в «звезду»; форма питающего тока в фазах статора – трапецидальная; магнитопровод ротора – конструкционная сталь СТ20 (с учетом нелинейности кривой намагничивания стали); магнитопровод статора – сталь СТ2211; коэрцитивная сила постоянных магнитов при температуре $T = 20$ °C задавалась равной $H_{CB} = 1011$ кА/м, остаточная индукция $B_r = 1,33$ Тл, магнитная проницаемость магнитов принята равной – $\mu_{PM} = 1,04$ (с учетом зависимости магнитной

проницаемости и коэрцитивной силы от температуры магнитов).

Предварительные расчеты показали, что количество полюсов статора не существенно влияет на значение электромагнитного момента. Так у электродвигателя М1 с внутренним диаметром ротора $d_{si} = 220$ мм и числом пазов статора $Z = 72$ среднее значение электромагнитного момента для диапазона частоты вращения $n = 1200 \div 1700$ об/мин составляет $M_{(Z=72)} = 251$ Нм, у электродвигателя с такой же высотой пазов как и у двигателя М1, но с числом пазов статора $Z=24$ – $M_{(Z=24)} = 252$ Нм.

Расчетные значения параметров исследуемых электродвигателей (мощности при частоте вращения $n = 2300$ об/мин и среднего значения электромагнитного момента для диапазона частоты вращения $n = 1200 \div 1700$ об/мин) в зависимости от числа пазов и внутреннего диаметра статора, полученные при плотности тока $J = 5$ А/мм² сведены в табл. 2.

Таблица 2 – Параметры исследуемых электродвигателей при плотности тока $J = 5$ А/мм²

Параметр	Дизельный двигатель	М1	М2.1	М2.2	М2.3	М2.4	М2
Z	-	72	24	24	24	24	24
d_{se} , мм	-	220	220	200	180	160	140
P_{out} , кВт при $n = 2300$ об/мин	140	60.5	60.8	85	95.8	105	108
M , Нм при $n = 1200 \div 1700$ об/мин	640	251	252	352	400	436	450

Если сравнивать эти модели при плотности тока $J = 5$ А/мм², например, для диапазона частоты вращения $n = 1200 \div 1700$ об/мин, то электромагнитный момент электродвигателя М2 равен $M_{(M2)} = 445 \div 450$ Нм, крутящий момент дизельного двигателя для этого диапазона частоты вращения составляет $M = 680$ Нм. При частоте вращения $n = 2300$ об/мин мощность на валу электродвигателя равна $P_{out(M2)} = 108$ кВт, мощность дизельного двигателя составляет $P = 140$ кВт. Аналогичные данные для электродвигателя М1 следующие: электромагнитный момент – $M_{(M1)} = 247 \div 251$ Нм, мощность – $P_{out(M1)} = 60,8$ кВт.

Если сравнивать эти две модели по удельному моменту (средний момент отнесенный к общей массе активной части) и по удельной мощности (мощность электродвигателя при частоте вращения $n = 2300$ об/мин отнесенная к общей массе активной части), то они следующие: $M_{уд(M1)} = 3,36$ Нм/кг; $M_{уд(M2)} = 4,87$ Нм/кг; $P_{уд(M1)} = 0,81$ кВт/кг; $P_{уд(M2)} = 1,17$ кВт/кг.

Сопоставление рабочих характеристик электродвигателей М1 и М2 представлено на рис. 2.

Таким образом при номинальной плотности тока электромагнитный момент и мощность на валу у двигателя М1 существенно ниже требуемого, у

двигателя М2 электромагнитный момент на 30% ниже требуемого, а мощность соответственно на 23% ниже требуемой.

С целью повышения удельных показателей электродвигателей (кВт/кг), применяемых в транспортных средствах необходимо использовать жидкостное охлаждение с принудительной циркуляцией охлаждающей жидкости. Для анализа теплового состояния моделей М1 и М2 при работе с перегрузкой (при плотности тока более, чем $J = 5$ А/мм²) создана трехмерная модель сектора электродвигателя равного одному полюсному делению. Данная модель (рис. 3а) учитывает процессы теплообмена не только в объеме электродвигателя, но и в системе жидкостного охлаждения. Система охлаждения представляет собой множество каналов, расположенных равномерно по всей внешней поверхности корпуса электродвигателя и сориентированных вдоль оси вращения электродвигателя. По этим каналам с помощью циркуляционного насоса пропускается теплоноситель (вода) с заданной скоростью и заданной начальной температурой. Перемещаясь по каналам системы охлаждения теплоноситель отбирает тепло, выделяемое обмотками электродвигателя.

Тепловая модель учитывает пазовую изоляцию

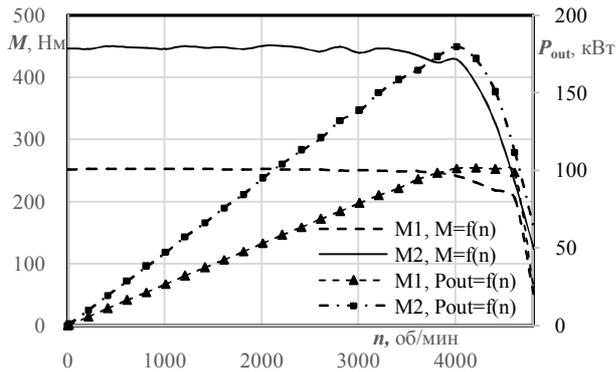
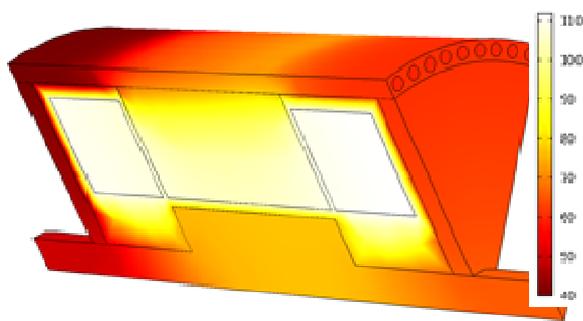


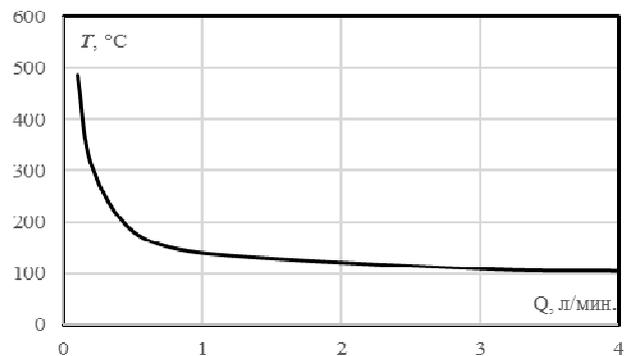
Рис. 2 – Сопоставление рабочих характеристик электродвигателей M1 и M2 при плотности тока $J = 5 \text{ А/мм}^2$ обмоток, зазор между магнитопроводом статора и его корпусом и изменение скорости теплоносителя по

мере приближения к стенкам канала. Исходные данные для теплового расчета, выполненного: температура охлаждающей жидкости на входе каналов $T_{\text{вх}} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ количество каналов $n_k = 72$; число параллельных путей в системе каналов $n_n = 72$; форма поперечного сечения проходного канала – круглая; диаметр каждого канала $d_k = 9 \text{ мм}$.

На рис. 3а приведена картина теплового поля электродвигателя M2 для случая, когда плотность тока равна $J = 7.5 \text{ А/мм}^2$, объемный расход охлаждающей жидкости $Q = 3 \text{ л/мин}$. По мере прокачивания охлаждающей жидкости с помощью циркуляционного насоса вдоль каналов часть тепла отбирается от элементов двигателя. На рис. 3б приведена зависимость температуры обмоток двигателя от производительности циркуляционного насоса.



а



б

Рис. 3 – Результаты расчета теплового поля электродвигателя M2:

а – картина теплового поля; б – зависимость температуры обмоток от производительности циркуляционного насоса

При отсутствии циркуляции жидкости обмотки нагревались бы свыше $500 \text{ }^\circ\text{C}$, что существенно выше допустимого, но при производительности циркуляционного насоса $Q = 3 \text{ л/мин}$ температура обмоток статора при плотности тока $J = 7,5 \text{ А/мм}^2$ не превышает $108 \text{ }^\circ\text{C}$, что существенно ниже допустимой температуры для изоляции класса Н.

Как видно из графика (рис. 3б) при производительности циркуляционного насоса свыше 3 л/мин температура обмоток уменьшается незначительно, поэтому все дальнейшие расчеты выполнены при производительности насоса $Q = 3 \text{ л/мин}$.

На рис. 4 приведена зависимость температуры обмоток статора для электродвигателей M1 и M2 от плотности тока для случая, когда производительность циркуляционного насоса $Q = 3 \text{ л/мин}$. Масса обмоток статора у электродвигателя M1 в 2,8 раза меньше, чем у электродвигателя M2, поэтому при одинаковой плотности тока у двигателя M2 обмотки нагреваются сильнее.

На рис. 5 приведены рабочие характеристики электродвигателей M1 и M2. Чтобы получить заданные параметры по электромагнитному моменту и мощности у электродвигателя M1 должна быть

плотность тока равная $J = 13 \text{ А/мм}^2$, у электродвигателя M2 плотность меньше и составляет – $J = 7,5 \text{ А/мм}^2$. При этом с учетом производительности циркуляционного насоса обмотки статора электродвигателя M1 нагреваются до $140 \text{ }^\circ\text{C}$, а электродвигателя M2 – до $108 \text{ }^\circ\text{C}$.

При плотности тока $J = 13 \text{ А/мм}^2$ для диапазона частоты вращения $n = 1200 \div 1700 \text{ об/мин}$ электромагнитный момент электродвигателя M1 составляет $M_{(M1)} = 640 \div 648 \text{ Нм}$, а для электродвигателя M2 при плотности тока $J = 7,5 \text{ А/мм}^2$ крутящий момент составляет $M_{(M2)} = 690 \div 696 \text{ Нм}$. Крутящий момент дизельного двигателя для этого диапазона частоты вращения составляет $M = 680 \text{ Нм}$. При частоте вращения $n = 2300 \text{ об/мин}$ мощность на валу электродвигателя M1 равна $P_{\text{out}(M1)} = 156 \text{ кВт}$, мощность электродвигателей M1 и M2 от плотности тока в обмотке (при $Q = 3 \text{ л/мин.}$) электродвигателя M2 равна – $P_{\text{out}(M2)} = 168 \text{ кВт}$, мощность дизельного двигателя для этой частоты вращения составляет $P = 140 \text{ кВт}$. Таким образом, при жидкостном охлаждении и увеличенной плотности тока электродвигатель M2 обладает лучшими характеристиками и обеспечивается запас по мощности и моменту, а значит улучшаются скоростные характеристики электробуса.

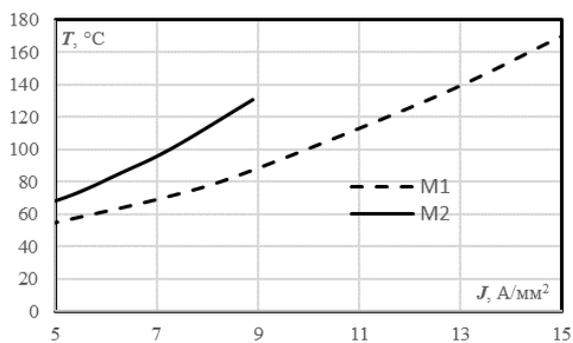


Рис. 4 – Зависимость температуры обмоток статора для

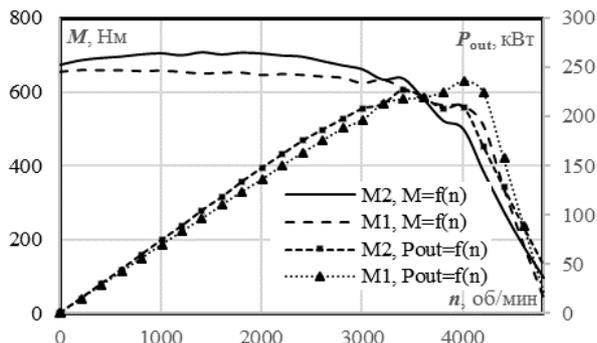


Рис. 5 – Рабочие характеристики электродвигателей М1 и М2 при плотности тока $J = 13 \text{ А/мм}^2$ и $J = 7,5 \text{ А/мм}^2$ соответственно

На втором этапе численных экспериментов исследовалось влияние конфигурации магнитной системы ротора на рабочие характеристики электродвигателя. За основу была взята конфигурация статора электродвигателя М2, для которого получены наибольшие значения мощности и электромагнитного момента. Пакет Infoiytica MotorSolve позволяет задавать 30 типов различной конфигурации магнитной системы ротора, в том числе, с наружным и внутренним расположением магнитов в один, два и три слоя. На рис.6 показаны линии равного потенциала для трех типов моделей с различной конфигурацией магнитной системы ротора: М2 – модель с тангенциальной намагниченностью (эта модель представлена на рис. 1); М3 – модель, в которой каждый из полюсов имеет девять магнитов, размещенных таким образом, что между ними имеется тонкий слой электротехнической стали; М4 – модель с радиальной намагниченностью магнитов. Число полюсов для каждой из моделей равно восьми. Для удобства восприятия материала на рис. 6,б магниты выделены черным цветом.

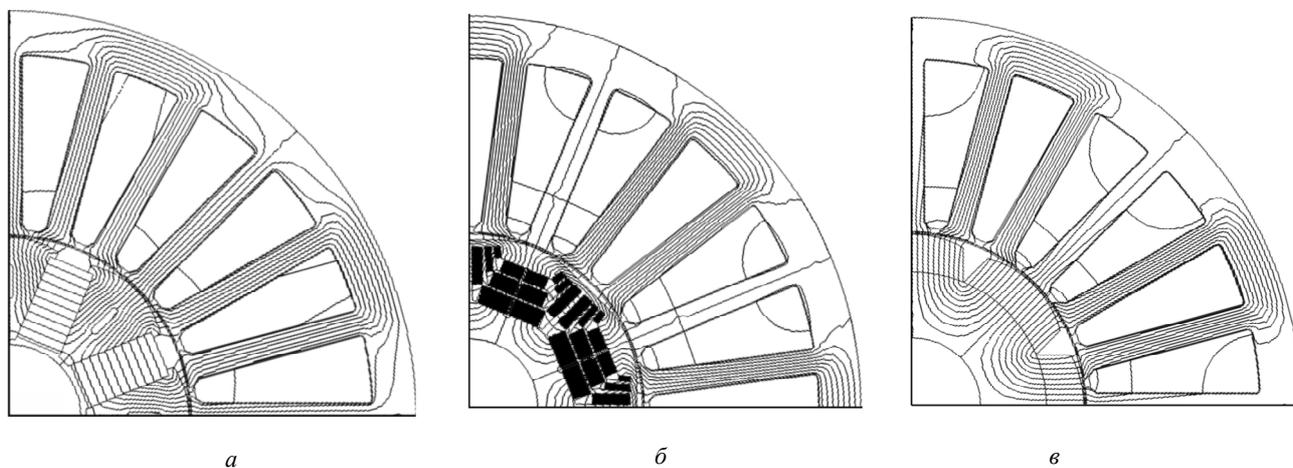


Рис. 6 – Картина магнитного потока в сечении магнитопроводов:
а – электродвигатель М2; б – электродвигатель М3; в – электродвигатель М4

Для уменьшения пульсаций электро-магнитного момента в каждой из моделей применено профилирование ферромагнитных полюсов (М2 и М3) либо магнитов (М3). Расчетные значения параметров электродвигателей с различной конфигурацией ротора, полученные при плотности тока $J = 7,5 \text{ А/мм}^2$ сведены в табл. 3.

Таблица 3 – Параметры исследуемых электродвигателей при плотности тока $J = 7,5 \text{ А/мм}^2$

Параметр	М2	М3	М4
P_{out} , кВт при $n=2300 \text{ об/мин}$	168	143	166
M , Нм при $n = 1200 \div 1700 \text{ об/мин}$	696	655	680

Таким образом, если сравнивать характеристики моделей электродвигателей M2, M3 и M4, то для заданного диапазона частоты вращения значения электромагнитного момента и мощности для двигателей с тангенциальным намагничиванием магнитов (M2) и радиальным намагничиванием (M4) практически совпадают, у модели двигателя M3 эти значения несколько ниже. Если сравнивать рабочие характеристики, например, моделей M3 и M4 для всего диапазона частоты вращения, то мощность и электромагнитный момент в диапазоне частоты вращения $n = 3000\div 4000$ об/мин существенно выше для модели электродвигателя M4 (рис. 7).

Выбор между конфигурацией магнитной системы ротора с тангенциальным намагничиванием магнитов (M2) или радиальным (M4) должен определяться в том числе и с учетом стоимости и технологичности изготовления электродвигателя.

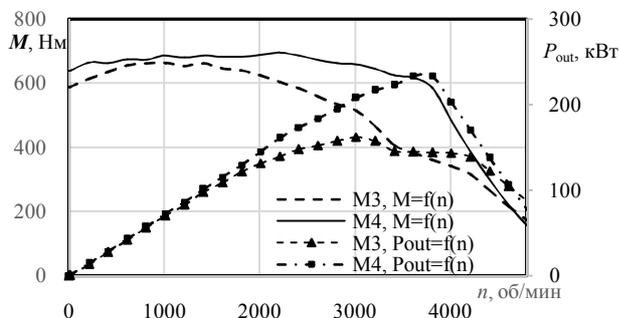


Рис. 7 – Рабочие характеристики электродвигателей M3 и M4 при $J = 7,5$ А/мм²

При единичном или мелкосерийном производстве стоимость магнитов специальной формы будет существенно выше, чем прямоугольной формы, однако при крупносерийном производстве разница в стоимости ПМ специальной и прямоугольной формы не будет столь существенной. Поэтому при единичном и мелкосерийном производстве предпочтительней вариант с тангенциальным намагничиванием постоянных магнитов (M2). Удельные характеристики электродвигателя M2 при плотности тока $J = 7,5$ А/мм² следующие: $M_{уд(M2)} = 7,53$ Нм/кг; $P_{уд(M2)} = 1,81$ кВт/кг.

Электрогенератор для последовательной схемы электротрансмиссии гибридной силовой установки может быть таким же как и электродвигатель M2. Недостающая мощность может быть скомпенсирована аккумуляторными батареями.

Выводы. В результате моделирования электродвигателей с различной конфигурацией магнитной системы установлено, что наибольшим электромагнитным моментом обладает конфигурация с увеличенной высотой паза и тангенциальным намагничиванием магнитов (M2).

Результаты расчетов подтверждают, что электродвигатель (M2) может быть использован в автобусе средней вместимости вместо дизельного двигателя. При жидкостном охлаждении и плотности

тока $J = 7,5$ А/мм² для диапазона частоты вращения $n = 1200\div 1700$ об/мин электромагнитный момент электродвигателя M2 составляет $M_{(2)} = 690\div 696$ Нм. Крутящий момент дизельного двигателя для этого диапазона частоты вращения составляет $M = 680$ Нм.

Также электродвигатель M2 имеет запас по мощности. При частоте вращения $n = 2300$ об/мин мощность на валу электродвигателя M2 равна – $P_{out(M2)} = 168$ кВт, мощность дизельного двигателя составляет $P = 140$ кВт.

Список литературы

1. Шумов Ю. Н. Энергосберегающие электрические машины для привода электромобилей и гибридных автомобилей (Обзор зарубежных разработок) / Ю. Н. Шумов, А. С. Сафронов. // Электричество. – 2016. – №1. – С. 55–65.
2. Da Ru D. An SPM Motor Drive Dressed as IPM Motor Drive for a Flexible Test Bench of Salient Rotor Propulsion Machines / D. Da Ru, M. Morandin, S. Bolognani, M. Castiello // Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). – IEEE. – 2015. – P. 1–6.
3. Tinazzi F. Torque Estimation in High-Efficiency IPM Synchronous Motor Drives / F. Tinazzi, M. Zigliotto // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2015. – Vol. 30. – № 3. – P. 983–990.
4. Salimi A. On the Role of Robustness in Multi-Objective Robust Optimization: Application to an IPM Motor Design Problem / A. Salimi D. A. Lowther // IEEE Transactions on Magnetics. – 2016. – Vol. 52. – No. 3. – P. 1–4.
5. Das A. Investigation of PMSM motor performance with different magnet configurations and rotor surface profiling / A. Das, A. Konwar, A. Dalal, P. Kumar // Transportation Electrification Conference (ITEC). – IEEE – 2015. – P. 1–6.
6. Islam M. Z. Obtaining optimized designs of multi-phase PMSM-SynRM using lumped parameter model based optimizer / M. Z. Islam, S. R. Bonthu, S. Choi // IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). – 2015. – P. 1722–1728.
7. Lazari P. Effect of Laser Cut on the Performance of Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Machines / P. Lazari, K. Atallah, J. Wang // IEEE Transactions on Magnetics. – 2015. – Vol. 51. – No. 11. – P. 1–4.
8. Гребеников В. В. Влияние высоты пазов статора на характеристики электрических машин с постоянными магнитами / В. В. Гребеников, М. В. Прыймак // Вісник НТУ «ХП»: Сер.: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. – 2015. – Вип. 5 (1114). – С. 32–36.
9. Гребеников В. В. Сравнительный анализ модификаций магнитной системы электродвигателя для электробуса / В. В. Гребеников, П. Шымчак, Прыймак М. В. // Праці ІЕД НАНУ: 36. наук. пр. – 2016. – Вип. 43. – С.48–53.

References (transliterated)

1. Shumov Yu. N., Safonov A. S. Energoberegayushchie elektricheskie mashinyi dlya privoda elektromobiley i gibridnyh avtomobiley (Obzor zarubezhnyh razrabotok) [Energy-Saving Electrical Machines for Driving Electric and Hybrid Vehicles (a Review of Foreign Developments)]. *Elektrichestvo*, 2016, no. 1. pp. 55–65.
2. Da Ru D. et al. An SPM Motor Drive Dressed as IPM Motor Drive for a Flexible Test Bench of Salient Rotor Propulsion Machines, *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, IEEE, 2015, pp. 1–6.
3. Tinazzi F., Zigliotto M. Torque Estimation in High-Efficiency IPM Synchronous Motor Drives, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2015, vol. 30, no. 3, pp. 983–990.
4. Salimi A., Lowther D. A. On the Role of Robustness in Multi-Objective Robust Optimization: Application to an IPM Motor Design Problem, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2016, vol. 52, no. 3, pp. 1–4.
5. Das A. et al. Investigation of PMSM motor performance with

- different magnet configurations and rotor surface profiling, *Transportation Electrification Conference (ITEC)*, IEEE, 2015, pp. 1–6.
6. Islam M. Z., Bonthu S. R., Choi S. Obtaining optimized designs of multi-phase PMA–SynRM using lumped parameter model based optimizer, *IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, 2015, pp. 1722–1728.
 7. Lazari P., Atallah K., Wang J. Effect of Laser Cut on the Performance of Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Machines. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2015, vol. 51, no. 11, pp. 1–4.
 8. Grebenikov V. V., Pryjmak M. V. Vliyanie vysoty pazov statora na karakteristiki ehlektricheskikh mashin s postoyannymi magnitami [Influence of stator slots height on the characteristics of electrical machines with permanent magnets]. *Visnyk NTU «KhPI»: Ser.: Elektrichni mashini ta elektromekhanichne peretvorennya energii*, 2015, vol. 5 (1114), pp. 32–36.
 9. Grebenikov V.V., Shymchak P., Prijmak M.V. Sravnitel'nyy analiz modifikacij magnitnoj sistemy ehlektrovdigatelya dlya ehlektrobusa [Comparative analysis of magnetic systems modifications for electric motor of electric bus]. *Praci IED NANU: Zb. nauk. pr.*, 2016, vol. 43, pp. 48–53.

Поступила (received) 14.07.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Сравнительный анализ магнитных систем электродвигателей с постоянными магнитами для электробуса / В. В. Гребеников, М. В. Приймак // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 11 (1183). – С. 42–48. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2409-9295.

Сравнительный анализ магнитных систем электродвигателей с постоянными магнитами для электробуса / В. В. Гребеников, М. В. Приймак // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 11 (1183). – С. 42–48. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2409-9295.

Comparative analysis of magnetic electric motors with permanent magnets for electric buses / V. V. Grebnikov, M. V. Pryimak // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – No. 11 (1183). – P. 42–48. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2409-9295.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Гребеников Віктор Володимирович – доктор технічних наук, провідний науковий співробітник, Інститут електродинаміки національної академії наук України; м. Київ; тел. (067) 441-73-72; e-mail: elm1153@gmail.com.

Гребеников Виктор Владимирович – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт электродинамики национальной академии наук Украины; г. Киев; тел. (067) 441-73-72; e-mail: elm1153@gmail.com.

Grebenikov Viktor Vladimirovich – Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher, the Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv; tel. (067) 441-73-72; e-mail: elm1153@gmail.com.

Приймак Максим Васильович – Інженер 1 категорії, Інститут електродинаміки національної академії наук України; м. Київ; тел. (044) 366-26-66; e-mail: maksim.prv@gmail.com

Приймак Максим Васильевич – Инженер 1 категории, Институт электродинамики национальной академии наук Украины, г. Киев; тел. (044) 366-26-66; e-mail: maksim.prv@gmail.com

Pryjmak Maxim Vasilevich – engineer 1 category, Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv; tel. (044) 366-26-66; e-mail: maksim.prv@gmail.com