

В. В. ГРЕБЕНИКОВ, М. В. ПРИЙМАК

ИССЛЕДОВАНИЕ МОТОР-КОЛЕСА ДЛЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ С ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ И РЕДУКТОРОМ НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ С УЧЕТОМ ГОРОДСКОГО И ЗАГОРОДНЕГО ЕЗДОВЫХ ЦИКЛОВ

Наведено результати дослідження характеристик електродвигуна і редуктора з неодимовими магнітами для мотор-колеса електромобіля. Для заданих габаритів мотор-колеса з магнітним редуктором (зовнішній діаметр, осьова довжина електродвигуна і редуктора) визначена конфігурацію і розміри магнітної системи електродвигуна і редуктора, при якій досягається необхідне значення моменту в заданому діапазоні частоти обертання з урахуванням їздових циклів. Розрахунок характеристик досліджуваного електродвигуна і редуктора виконаний в програмному пакеті Infolytica MotorSolve і Magnet.

Ключові слова: мотор-колесо, електродвигун і редуктор на постійних магнітах, електромагнітний момент, робочі характеристики, чисельне моделювання, європейський їздовий цикл.

Приведены результаты исследования характеристик электродвигателя и редуктора с неодимовыми магнитами для мотор-колеса электромобили. Для заданных габаритов мотор-колеса с магнитным редуктором (внешний диаметр, осевая длина электродвигателя и редуктора) определена конфигурацию и размеры магнитной системы электродвигателя и редуктора, при которой достигается требуемое значение момента в заданном диапазоне частоты вращения с учетом ездовых циклов. Расчет характеристик исследуемого электродвигателя и редуктора выполнен в программном пакете Infolytica MotorSolve и Magnet.

Ключевые слова: мотор-колесо, электродвигатель и редуктор на постоянных магнитах, электромагнитный момент, рабочие характеристики, численное моделирование, европейский ездовой цикл.

The results of a study of the characteristics of an electric motor and a gear with neodymium magnets for the motor-wheel of an electric vehicle are presented. The study of the traction characteristics of the motor-wheel for an electric vehicle was carried out taking into account the European driving cycle, which describes the movement of the vehicle in the city and in the countryside (engine operation in the minimum speed mode, starting and acceleration to a certain speed, braking from one speed to another). For the given dimensions of the motor-wheel with a magnetic gear (outer diameter, axial length of the electric motor and gear), the configuration and dimensions of the magnetic system of the electric motor and gearbox are determined, at which the required torque value is achieved within a given speed range, taking into account drive cycles. Calculation of the characteristics for the investigated electric motor and gear is made by the software package Infolytica MotorSolve and Magnet.

Keywords: motor-wheel, electric motor and gear with permanent magnets, electromagnetic torque, performance characteristics, numerical simulation, the European driving cycle.

Введение. В настоящее время наблюдается интенсивный рост продаж электромобилей. Рост мировых продаж в четвертом квартале 2017 года составил 23 % по сравнению со вторым кварталом 2017 года и 63 % – по сравнению с третьим кварталом 2016 года. Правительства многих стран заявили, что откажутся от продаж автомобилей с бензиновыми и дизельными двигателями, чтобы снизить выбросы вредных веществ в атмосферу и зависимость от нефтепродуктов. В связи с этим наблюдается рост инвестиций в развитие тяговых электродвигателей. Согласно прогнозам, в 2030 г. будет произведено 120 млн транспортных средств с электроприводом (включая скутеры, байки), и половина из них – электромобили, т. е. будет произведено более 60 млн тяговых электродвигателей [1].

Наряду с применением электродвигателей для электромобилей, устанавливаемых вместо дизельных или бензиновых двигателей также находят применение электрические мотор-колеса. Применение мотор-колес позволяет отказаться от коробки передач и главной механической передачи электромобили, что значительно упрощает его кинематику и снижает его стоимость. Кроме того, в электротранспорте при использовании четырех мотор-колес можно реализовать самые сложные алгоритмы управления за счет раздельного управления скоростью и моментом каждого из двигателей мотор-колеса.

В иностранной и отечественной научно-технической литературе исследуются электродвигатели для мотор-колес с постоянными магнитами как цилиндрического типа [2, 3], так и аксиального (дис-

кового) [4], а также на основе вентильно-индукторных электродвигателей [5, 6]. Каждый из указанных типов имеет свои преимущества и недостатки. В данной работе исследуется электродвигатель мотор-колеса с постоянными магнитами цилиндрического типа.

Анализ состояния вопроса. При проектировании мотор-колес для электромобилей следует учитывать ездовой цикл, который описывает движение транспортного средства в городе и за городом (работа двигателя в режиме минимальной частоты вращения, трогание с места и разгон до определенной скорости, торможение двигателем с одной скорости до другой). Европейский ездовой цикл NEDC (New European Driving Cycle) состоит из двух частей, первая часть цикла – городской ездовой цикл UDC (Urban Driving Cycle) состоит из четырех одинаковых блоков каждый продолжительностью 195 сек. В соответствии с этим циклом транспортное средство на определенных участках разгоняется до скорости 18-32-50 км/час. Загородное движение описывается отдельным блоком EUDC (ExtraUrban Driving Cycle) продолжительностью 400 сек с чередованием скорости движения 70-50-100-120 км/час.

В качестве исходных данных при исследовании мотор-колес с магнитным редуктором приняты параметры автомобиля класса «стандарт», например, Skoda Octavia, Ford Focus: полная масса автомобиля – $m = 1900$ кг; коэффициент сопротивления воздуха для кузова шасси – $C_x = 0,3$; лобовая площадь кузова шасси – $S = 2,1$ м²; радиус колес – $r = 0,32$ м; колесные диски – R16; коэффициент трения качения – $f = 0,018$.

© В.В. Гребеников, М.В. Приймак, 2018

На автомобиль при движении действуют следующие силы: сила тяги ведущих колес, сила трения качения колес, сила сопротивления подъему, сила сопротивления воздуха, сила сопротивления разгону (сила инерции). С учетом приведенных исходных данных и сил, действующих на автомобиль при движении, определены частота вращения ротора и момент на валу двигателя.

На рис. 1 приведены зависимости частоты вращения колес и момента, необходимого для движения автомобиля согласно городского ездового цикла, рассчитанные при движении автомобиля в гору с углом наклона дороги $\alpha = 12\%$ и на прямолинейном участке дороги ($\alpha = 0\%$). Согласно нормативных документов максимальный угол уклона дороги не должен превышать 12% . Этот момент рассчитан исходя из условия, что коробка передач и главная передача отсутствуют. Анализируя кривые на рис. 1, следует отметить, что на одном из участков городского ездового цикла ($t = 15\text{--}17,5\text{ с}$) выполняется разгон до скорости 15 км/час за $2,5\text{ сек}$. На этом участке при движении в гору с уклоном $\alpha = 12\%$ необходим наибольший момент для движения автомобиля, равный $M_{(\alpha=12\%)} = 2000\text{ Н}\cdot\text{м}$, при движении с нулевым уклоном дороги ($\alpha = 0\%$), момент на этом участке должен быть в $1,6$ раза меньше – $M_{(\alpha=0\%)} = 1300\text{ Н}\cdot\text{м}$. Частота вращения колес при скорости $V = 15\text{ км/час}$ равна $n = 124\text{ об/мин}$.

На участках с постоянной скоростью при движении в гору с уклоном 12% момент должен быть более, чем в $6,5\text{--}7,5$ раз больше, чем при движении на прямолинейном участке: $t = 17,5\text{--}22,5\text{ с}$, $V = 15\text{ км/час}$, $M_{(\alpha=12\%)} = 890\text{ Н}\cdot\text{м}$, $M_{(\alpha=0\%)} = 119\text{ Н}\cdot\text{м}$, $n = 124\text{ об/мин}$; $t = 142,5\text{--}157,5\text{ с}$, $V = 50\text{ км/час}$, $M_{(\alpha=12\%)} = 914\text{ Н}\cdot\text{м}$, $M_{(\alpha=0\%)} = 144\text{ Н}\cdot\text{м}$, $n = 414\text{ об/мин}$.

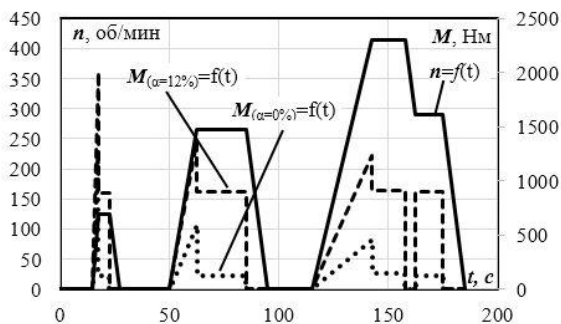


Рис. 1 – Зависимость момента, необходимого для движения автомобиля, и частоты вращения колес согласно городскому ездовому циклу

На рис. 2 приведены зависимости момента и частоты вращения для загородного ездового цикла. Для этого цикла пиковый момент равен $M_{(\alpha=12\%)} = 1305\text{ Н}\cdot\text{м}$ на участке разгона $t = 190\text{--}200\text{ с}$.

Также для этого ездового цикла на участках с постоянной скоростью момент, необходимый для движения автомобиля, должен быть в $4\text{--}5,5$ раз больше при движении в гору, чем при движении на участке с нулевым уклоном: $t = 60\text{--}110\text{ с}$, $V = 70\text{ км/час}$, $M_{(\alpha=12\%)} = 940\text{ Н}\cdot\text{м}$, $M_{(\alpha=0\%)} = 170\text{ Н}\cdot\text{м}$, $n = 580\text{ об/мин}$;

$t = 335\text{--}345\text{ с}$, $V = 120\text{ км/час}$, $M_{(\alpha=12\%)} = 1044\text{ Н}\cdot\text{м}$, $M_{(\alpha=0\%)} = 274\text{ Н}\cdot\text{м}$, $n = 994\text{ об/мин}$.

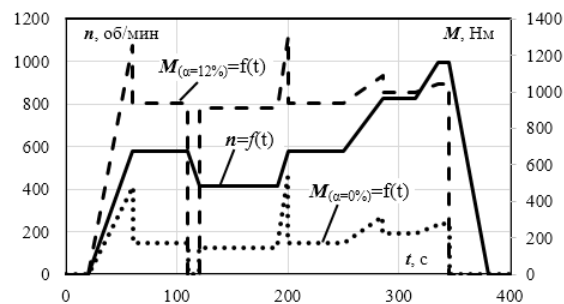


Рис. 2 – Зависимость момента, необходимого для движения автомобиля, и частоты вращения колес согласно загородному ездовому циклу

Если оснастить автомобиль четырьмя мотор-колесами, то на каждом из них должен быть момент вчетверо меньше, т.е., если на одном из участков городского цикла максимальный пиковый момент равен $M_{(\alpha=12\%)} = 2000\text{ Н}\cdot\text{м}$, то на каждом из мотор-колес должен быть момент $M_{\text{МК}(\alpha=12\%)} = 500\text{ Н}\cdot\text{м}$. Соответственно на одном из участков загородного ездового цикла пиковый момент равен $M_{(\alpha=12\%)} = 1305\text{ Н}\cdot\text{м}$, значит момент на каждом из мотор-колес должен быть $M_{\text{МК}(\alpha=12\%)} = 326\text{ Н}\cdot\text{м}$. С учетом того, что частота вращения колес для рассматриваемых ездовых циклов находится в диапазоне $n = 124\text{--}995\text{ об/мин}$, то довольно трудно обеспечить без редуктора расчетные значения момента и частоты вращения в габаритах колесного диска R16. Поэтому для обеспечения необходимого момента и заданной частоты вращения мотор-колеса необходимо оснащать магнитным понижающим редуктором, т.е. главный редуктор и коробка передач заменяются магнитным редуктором, размещаемом в мотор-колесе.

В иностранной научно-технической литературе исследуются как электродвигатели мотор-колес с понижающим редукторами на постоянных магнитах [7, 8], так и отдельно редукторы с постоянными магнитами [9, 10].

Следует отметить, что исследованию характеристик мотор-колеса с электродвигателем и редуктором на постоянных магнитах с учетом городского и загородного ездовых циклов не уделено достаточно внимания.

Цель исследований. Для заданных габаритов мотор-колеса с магнитным редуктором (внешний диаметр, осевая длина электродвигателя и редуктора) определить конфигурацию и размеры магнитной системы электродвигателя и редуктора, при которой достигается требуемое значение момента в заданном диапазоне частоты вращения с учетом городского и загородного ездовых циклов.

Постановка задачи. При исследовании характеристик мотор-колеса с магнитным редуктором следует учитывать, что габариты определяются пространством, которое задается размерами диска R16. Чтобы мотор-колесо с редуктором разместилось в пространстве этого диска размеры должны быть не более: диаметр – 390 мм , аксиальная длина – 130 мм .

На рис. 3 упрощенно показана схема размещения электродвигателя с магнитным редуктором в диске R16 (без подшипников, подшипниковых щитов и обмоток двигателя).

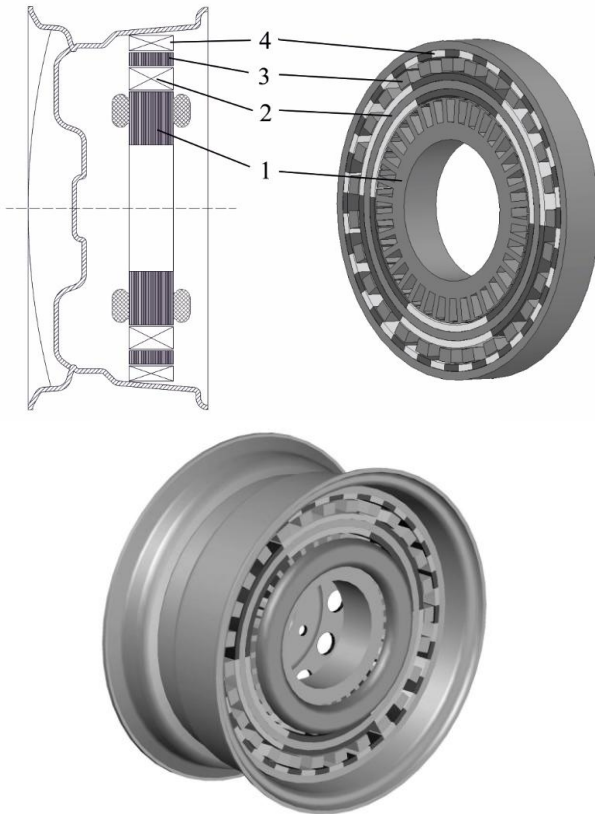


Рис. 3 – Схема размещения электродвигателя с магнитным редуктором в автомобильном диске R16.

На рис. 4 показана магнитная система исследуемой системы, которая состоит из статора электродвигателя 1, внутреннего высокоскоростного ротора 2, состоящего из двух слоев радиально намагниченных магнитов, неподвижных сегментов из электротехнической шихтованной стали 3, внешнего низкоскоростного ротора с радиально намагниченными постоянными магнитами 4, закрепленными на ферромагнитном замыкателе из конструкционной стали, который механически соединяется с диском колеса.

Конфигурация магнитной системы магнитных редукторов существенным образом влияет на их характеристики [7-10]. Передаточное отношение магнитного редуктора и число неподвижных ферромагнитных сегментов определяется соотношением между числом пар полюсов на низкоскоростном (внешнем) и высокоскоростном (внутреннем) роторе:

$$G_r = p_h/p_l; \omega_h = -G_r \omega_l; \quad n_s = p_l + p_h,$$

где G_r – передаточное отношение магнитного редуктора; p_l – число пар полюсов низкоскоростного ротора; p_h – число пар полюсов высокоскоростного ротора; n_s – число неподвижных стальных сегментов; ω_l – частота вращения низкоскоростного ротора; ω_h – частота вращения высокоскоростного ротора (низкоскоростной и высокоскоростной ротор вращаются в противоположных направлениях).

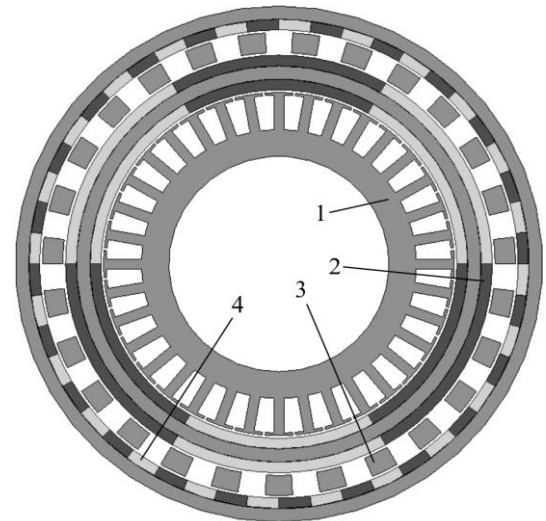


Рис. 4 – Общий вид электродвигателя с магнитным редуктором

Параметры исследуемого редуктора: толщина постоянных магнитов, высота неподвижных стальных сегментов, варьировались таким образом, чтобы обеспечить величину электромагнитного момента на внешнем низкоскоростном роторе не менее $M_{МК(\alpha=12\%)} = 500$ Н·м. При этом задавались неизменными следующие параметры: передаточное отношение редуктора – $G_r = 8$, число неподвижных стальных сегментов – $n_s = 27$, число пар полюсов низкоскоростного ротора – $p_l = 24$, число пар полюсов высокоскоростного ротора – $p_h = 3$, величина зазора между внешним ротором и стальными сегментами, а также между внутренним ротором и стальными сегментами – $\delta_{ред} = 2$ мм.

С учетом максимального значения электромагнитного момента для каждого мотор-колеса, равного $M_{МК(\alpha=12\%)} = 500$ Н·м и с учетом передаточного отношения магнитного редуктора, равного $G_r = 8$, значение электромагнитного момента, развиваемого электродвигателем каждого мотор-колеса в диапазоне частоты вращения $n = 100-8000$ об/мин должно быть не менее $M = 62.5$ Н·м.

Поэтому параметры исследуемого электродвигателя: размеры магнитной системы электродвигателя (внешний диаметр статора, внутренний диаметр статора, высота пазов статора, толщина зубцов статора, величина раскрытия паза статора, толщина магнитов); число витков обмоток статора варьировались таким образом, чтобы обеспечить требуемое значение электромагнитного момента ($M = 62.5$ Н·м) в заданном диапазоне частоты вращения ($n = 100-8000$ об/мин) [11, 12]. Рабочий зазор задавался равным – $\delta = 2$ мм.

Результаты численного исследования. Для реализации поставленной цели на первом этапе производился расчет рабочих характеристик исследуемого электродвигателя с внешним ротором при следующих условиях: напряжение питания – 600 В; обмотки статора включены в «звезду»; форма питающего тока в фазах статора – синусоидальная; магнитопровод статора – сталь СТ2211; магнитопровод ротора – конст-

рукционная сталь СТ20; тип постоянных магнитов – 40SH; коэффициент заполнения обмоточного окна – 0,4.

В результате ряда расчетов путем варьирования геометрическими параметрами магнитной системы электродвигателя были определены оптимальные соотношения между внешним и внутренним диаметром статора, а также основные размеры магнитной системы, обеспечивающие с 10 % запасом значение электромагнитного момента ($M = 70 \text{ Н}\cdot\text{м}$) в диапазоне частоты вращения ($n = 100\text{--}8000 \text{ об/мин}$).

На рис. 5 приведена картина магнитного поля в виде силовых линий электродвигателя мотор-колеса с магнитным редуктором для режима пиковой нагрузки.

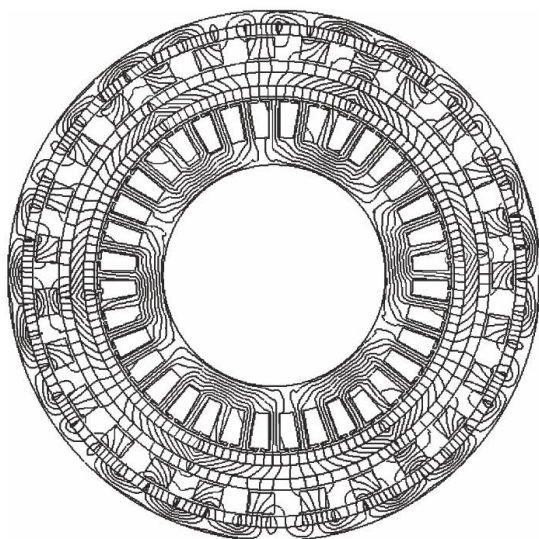


Рис. 5 – Магнитное поле электродвигателя мотор-колеса с магнитным редуктором в режиме пиковой нагрузки

Для электродвигателя также необходимо в результате численных экспериментов подобрать число витков обмоток статора, при котором обеспечивается максимальный электромагнитный момент в заданном диапазоне частоты вращения ротора. При значении числа витков в каждой катушке статора, равном $w = 12$, электромагнитный момент практически неизменен в заданном диапазоне частоты вращения ротора, его снижение начинается только при частоте вращения $n = 8000 \text{ об/мин}$. Число катушек одной фазы статора – 12, соединение катушек одной фазы статора – параллельно-последовательное. Катушки объединены в четыре последовательно соединенные группы, в каждой из которых три параллельно соединенные катушки.

Рабочая характеристика электродвигателя, рассчитанная в программном пакете Infolytica MotorSolve, приведена на рис. 6. На этом рисунке приведена расчетная зависимости электромагнитного момента электродвигателя $M = f(n)$ от частоты вращения ротора, а также приведены графики пиковых моментов для городского и загородного ездовых циклов. Результаты численных исследований рабочих характеристик показали, что при частоте вращения ротора равной

$n = 8000 \text{ об/мин}$ электромагнитный момент равен $M = 70 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

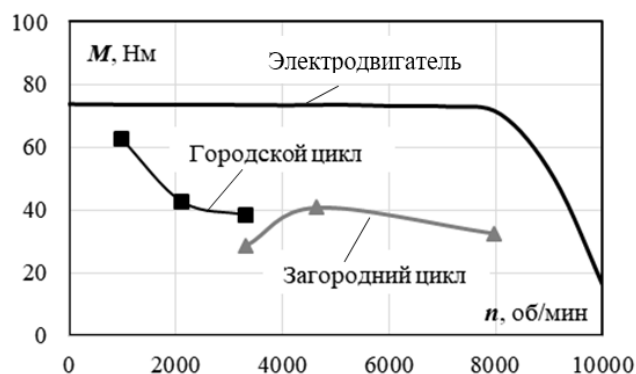


Рис. 6 – Рабочая характеристика электродвигателя и пиковые значения момента для европейского ездового цикла.

Чтобы получить значение электромагнитного момента, превышающие соответствующие пиковые значения момента городского ездового цикла у электродвигателя фазный ток должен быть равен $I = 110 \text{ А}$, плотность тока при этом токе равная $J = 7 \text{ А/мм}^2$. Для загородного ездового цикла максимальное пиковое значение момента составляет $41 \text{ Н}\cdot\text{м}$. Поскольку в ездовом цикле пиковое значение момента требуется обеспечить лишь на отдельных участках этого цикла, то плотность тока может быть несколько превышена без опасности перегрева электродвигателя выше допустимого.

Таким образом, результаты расчета показывают, что проектирование электродвигателя для электромобиля должно осуществляться с учетом пиковых моментов ездового цикла.

На втором этапе определялись геометрические параметры магнитного редуктора путем вариации толщины магнитов и высоты неподвижных стальных сегментов с целью определения размеров, обеспечивающих максимальное значение момента на внешнем низкоскоростном роторе магнитного редуктора. Это значение момента должно быть с 10 % запасом не менее $550 \text{ Н}\cdot\text{м}$, чтобы гарантировано обеспечить движение электромобиля согласно ездовых циклов.

На рис. 7 приведены зависимости максимального крутящего момента на внешнем низкоскоростном роторе магнитного редуктора от толщины постоянных магнитов и высоты стальных сегментов.

Геометрические параметры магнитного редуктора варьировались в следующем диапазоне: высота стальных неподвижных сегментов – $h_{\text{ст}} = 5\text{--}20 \text{ мм}$; толщина постоянных магнитов на внешнем низкоскоростном роторе и внутреннем высокоскоростном роторе: $h_{\text{ПМ}} = 7\text{--}8 \text{ мм}$. Требуемое значение момента достигается при толщине постоянных магнитов $h_{\text{ПМ}} = 8 \text{ мм}$ и высоте стальных неподвижных сегментов редуктора $h_{\text{ст}} = 15 \text{ мм}$.

Магнитные редукторы на постоянных магнитах, которые в отличие от механических редукторов не создают дополнительного шума, не требуют смазки,

долговечность работы у них выше. Особенностью такого редуктора является то, что при определенной величине нагрузки происходит выпадение из синхронизма (опрокидывание) ведомого ротора.

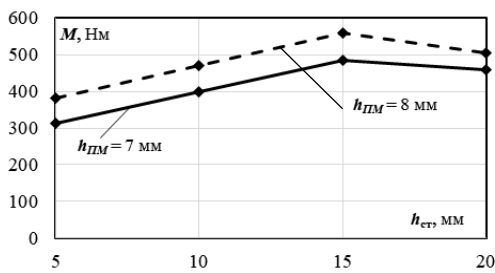


Рис. 7 – Зависимость максимального крутящего момента на внешнем роторе редуктора от толщины постоянных магнитов и высоты стальных сегментов

В отличие от механического редуктора в магнитном редукторе удастся избежать механического разрушения или износа редуктора при его перегрузке. После снижения внешней нагрузки до допустимых пределов, ведомый ротор редуктора автоматически синхронизирует свою скорость с ведущим.

Магнитная система редуктора имеет два отдельно вращающихся ротора. Программный пакет Infolytica MagNet может использоваться для моделирования таких магнитно связанных движущихся систем. Моделировалось это следующим образом. Обмотки электродвигателя запитывались синусоидальным трехфазным током частотой, при которой скорость вращения ротора электродвигателя и соответственно внутреннего ротора редуктора была равной $n = 8000$ об/мин. Внешний ротор магнитного редуктора вращается при этом в противоположную сторону со скоростью $n = 1000$ об/мин. В этом моделировании постепенно увеличивалась нагрузка на внешнем роторе (движение в гору с уклоном $\alpha = 12\%$). Как и ожидалось, при определенном значении нагрузки внешний ротор опрокидывается (начинает проскальзывать).

На рис. 8 приведена зависимость скорости вращения внешнего ротора от времени при увеличении нагрузки. Как видно из графика при величине нагрузки равной $M_n = 530$ Н·м резко уменьшается скорость вращения внешнего ротора, т.е. происходит его опрокидывание. Однако, как было определено выше, для электрообузда заданных параметров (масса, лобовая площадь кузова, радиус колес и пр.) максимальное значение момента для одного мотор-колеса равно $M_{МК(\alpha=12\%)} = 500$ Н·м.

Основные технические параметры электродвигателя мотор-колеса и редуктора с постоянными магнитами приведены в табл. 1.

Таким образом, в результате численных исследований определены геометрические параметры электродвигателя мотор-колеса и магнитного понижающего редуктора, которые гарантированно обеспечат перемещения электрообузда на всех участках городского и загородного ездовых циклов.

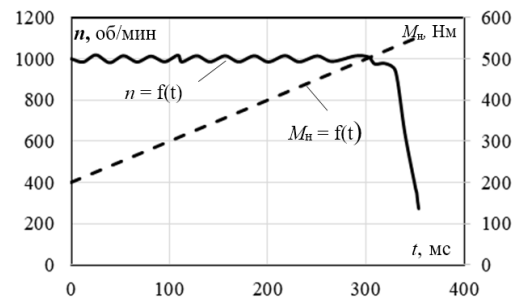


Рис. 8 – Зависимость частоты вращения внешнего ротора редуктора при увеличении нагрузки

Таблица 1 – Основные технические параметры мотор-колеса с магнитным редуктором

Параметр	Значение
Число фаз электродвигателя	3
Число пазов электродвигателя	36
Число пар полюсов внутреннего ротора	3
Число пар полюсов наружного ротора	24
Число неподвижных сегментов редуктора	27
Внешний диаметр статора электродвигателя, мм	258
Внутренний диаметр статора электродвигателя, мм	162
Число витков каждой катушки статора	12
Внешний диаметр внутреннего ротора редуктора, мм	314
Внешний диаметр наружного ротора редуктора, мм	388
Высота неподвижных стальных сегментов редуктора, мм	15
Аксиальная длина двигателя и редуктора, мм	50
Толщина магнитов электродвигателя и редуктора, мм	8
Рабочие зазоры, мм	2
Тип постоянных магнитов двигателя	N40SH
Тип постоянных магнитов редуктора	N40SH
Максимальная частота вращения внешнего ротора редуктора, об/мин	1000
Максимальный момент на внешнем роторе магнитного редуктора, Н·м	530
Максимальная частота вращения ротора электродвигателя, об/мин	8000
Максимальный момент электродвигателя, Н·м	70

Применение редуктора на постоянных магнитах, позволяет понизить частоту вращения мотор-колеса до необходимых значений, определяемых радиусом колеса и скоростью перемещения электрообузда в соответствии с европейским ездовым циклом. Оснащение электрообузда четырьмя мотор-колесами позволяет реализовать более гибкий алгоритм управления, чем в классическом случае за счет отдельного управления скоростью и моментом каждого из двигателей мотор-колеса. Кроме того, можно оснащать мотор-колесами существующие автомобили с бензиновым или дизельным двигателем и получать гибридное транспортное средство, которое, например, в городской черте перемещается только на электротяге, а за городом – используется двигатель внутреннего сгорания.

Выводы. 1. На стадии предварительного проектирования мотор-колеса для электромобиля с электродвигателем и редуктором на постоянных магнитах необходимо определить размеры магнитной системы с учетом массогабаритных параметров электромобиля, габаритов колесного диска и городского и загородного ездовых циклов.

2. Для заданных габаритных размеров электродвигателя определены оптимальные размеры магнитной системы и толщина постоянных магнитов, при которых обеспечивается требуемое пиковое значение электромагнитного момента электродвигателя.

3. Для обеспечения гарантированного перемещения электромобиля с учетом ездового цикла, и максимального уклона дороги ($\alpha = 12\%$) электродвигатель должен оснащаться магнитным редуктором, который в отличие от механического редуктора не создает дополнительных шумов, не требует смазки, а значит, долговечность работы у него выше.

4. Магнитный редуктор, в отличие от механического, может проскальзывать (опрокидываться), если нагрузка на внешнем роторе превышает определенное значение. Проведено численное моделирование совместной работы электродвигателя и магнитного редуктора и определены оптимальные размеры магнитной системы редуктора, при которых электромагнитный момент опрокидывания больше допустимого пикового момента при максимальном уклоне дороги.

Список литературы

- 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.
- Shihua Wu. Study on Improving the Performance of Permanent Magnet Wheel Motor for the Electric Vehicle Application / Shihua Wu, Liwei Song, Shumei Cui // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2007. – vol. 43. – No. 1. – pp. 438–442.
- Вершинин Д. В. Электропривод мотор-колеса электротранспортного средства / Д. В. Вершинин, В. А. Войтенко, Е. А. Смотров и др. // *Электромашиностроение и электро-оборудование*. – К.: Техника. – 2009. – Вып. 74. – С. 25–30.
- Yee-Pien Yang. Optimal Design and Control of a Wheel Motor for Electric Passenger Cars / Yee-Pien Yang, Down Su Chuang // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2007. – vol. 43. – No. 1. – pp. 51–61.
- Lovatt H. C. Design procedure for low cost, low mass, direct drive, in-wheel motor drivetrains for electric and hybrid vehicles. / H. C. Lovatt, D. Elton, L. Cahill and the others // *IECON 2011 - 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. – 2011. – pp. 4405–4409.
- Радимов И. Н. Сопоставительный анализ вентильных двигателей для электропривода мотор-колес легких транспортных средств / И. Н. Радимов, В. В. Рымша // *Электротехника и электромеханика*. – 2005. – № 3. – С. 42–44.
- Chau K. T. Design of a Magnetic-Geared Outer-Rotor Permanent-Magnet Brushless Motor for Electric Vehicles / K. T. Chau, Dong Zhang, J. Z. Jiang, Chunhua Liu, and Yuejin Zhang // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2007. – vol. 43, No. 6. – pp. 2504–2506.
- Wang L.L. Development of a Magnetic-Geared Permanent-Magnet Brushless Motor / L. L. Wang, J. X. Shen, P. C. K. Luk and the others // *Transactions on Magnetics*. – 2009. – vol. 43. – No. 10. – pp. 4578–4581.
- Linni Jian A Coaxial Magnetic Gear With Halbach Permanent-Magnet Arrays // Linni Jian, K. T. Chau // *Ieee Transactions on Energy Conversion*. – 2010. – vol. 25. – No. 2. – pp. 319–328.
- Jian L. Optimum Design for Improving Modulating-Effect of Coaxial Magnetic Gear Using Response Surface Methodology and Genetic Algorithm // L. Jian, G. Xu, J. Song and the others // *Progress In Electromagnetics Research*. – 2011. – vol. 116. – pp. 297–312.

Гребеников В. В. Сравнительный анализ магнитных систем электродвигателей с постоянными магнитами для электробуса / В. В. Гребеников, М. В. Приймак // *Вісник НТУ «ХПІ»*: Сер.: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. – 2016 – Вип. 11 (1183). – С.42–48.

Гребеников В. В. Сравнительный анализ модификаций магнитной системы электродвигателя для электробуса / В. В. Гребеников., П. Шымчак., М. В. Приймак // *Праці ІЕД НАНУ*: Зб. наук. пр., 2016. – Вип. 43. – С.48–53.

References (transliterated)

- Shumov Yu. N., Safonov A. S. Energoberegayushchie elektricheskie mashinyi dlya privoda elektromobiley i gibridnykh avtomobiley (Obzor zarubezhnykh razrabotok) [Energy-Saving Electrical Machines for Driving Electric and Hybrid Vehicles (a Review of Foreign Developments)]. *Elektrichestvo*, 2016, no. 1, pp. 55–65.
- Shihua Wu, Liwei Song, Shumei Cui. Study on Improving the Performance of Permanent Magnet Wheel Motor for the Electric Vehicle Application. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2007, vol. 43, No. 1. – pp. 438–442.
- Vershinin D.V., Vojtenko V.A., Smotrov E.A. i dr. Elektroprivod motor-kolesa `elektrotransportnogo sredstva [Electric drive motor-wheel electric vehicle]. *Elektromashinostroenie i elektrooborudovanie* – K.: Tehnika. – 2009. – Vyp. 74. – S. 25-30.
- Yee-Pien Yang, Down Su Chuang. Optimal Design and Control of a Wheel Motor for Electric Passenger Cars. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2007, vol. 43, No. 1, pp. 51–61.
- Lovatt H. C., Elton D., Cahill L. and the others. Design procedure for low cost, low mass, direct drive, in-wheel motor drivetrains for electric and hybrid vehicles. *IECON 2011 - 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2011, pp. 4405–4409.
- Radimov I. N., Rymsha V. V. Sopotavitel'nyy analiz ventil'nykh dvigatelej dlja `elektroprivoda motor-koles legkikh transportnykh sredstv [Comparative analysis of valve motors for the electric drive of motor-wheels of light vehicles] *Elektrotehnika i elektromekhanika*. – 2005. – № 3. – S. 42–44.
- Chau K. T., Dong Zhang, Jiang J. Z., Chunhua Liu, Yuejin Zhang. Design of a Magnetic-Geared Outer-Rotor Permanent-Magnet Brushless Motor for Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2007, vol. 43, No. 6, pp. 2504–2506.
- Wang L.L., Shen J. X., Luk P. C. K and the others. Development of a Magnetic-Geared Permanent-Magnet Brushless Motor. *Transactions on Magnetics*. 2009, vol. 43, No. 10, pp. 4578–4581.
- Linni Jian, Chau K. T. A Coaxial Magnetic Gear With Halbach Permanent-Magnet Arrays. *Ieee Transactions on Energy Conversion*. 2010, vol. 25, No. 2, pp. 319–328.
- Jian L., Xu G., Song J. and the others. Optimum Design for Improving Modulating-Effect of Coaxial Magnetic Gear Using Response Surface Methodology and Genetic Algorithm. *Progress In Electromagnetics Research*. 2011, vol. 116, pp. 297–312.
- Grebenikov V. V. Pryjmak M.V. Sravnitel'nyy analiz magnitnykh sistem jelektrodvigatelej s postojannymi magnitami dlja jelektrobusa [Comparative analysis of magnetic systems of electric motors with permanent magnets for electric bus] *Visnyk NTU «KhPI»*: Ser: Elektrichni mashyny ta elektromekhanichne peretvorennya enerhiyi, 2016, vol. 11(1183), pp. 42–48
- Grebenikov V. V. Shymchak P., Priymak M. V. Sravnitel'nyy analiz modifikatsiy magnitnoy sistemy elektrodvigatelya dlya elektrobusa [Influence of liquid cooling on characteristics of electric machine with permanent magnets] *Pratsi IED NANU*: Zb. nauk. pr., 2016, vip. 43, pp. 48–53.

Поступила (received) 12.03.2018

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Дослідження мотор-колеса для електромобіля з електродвигуном і редуктором на постійних магнітах з урахуванням міського та заміського їздових циклів // В. В. Гребеников, М. В. Приймак // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 83–89. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2409-9295.

Исследование мотор-колеса для электромобиля с электродвигателем и редуктором на постоянных магнитах с учетом городского и загородного ездовых циклов // В. В. Гребеников, М. В. Приймак // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 83–89. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2409-9295.

Study of a motor-wheel for an electric vehicle with an electric motor and a gear with permanent magnets, taking into account urban and countryside driving cycles // V. V. Grebrenikov, M. V. Priymak // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2018. – No. 5 (1281). – P. 83–89. – Bibliogr.: 12. – 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; 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

Prjymak 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