

Расчет и конструирование

УДК 621.313.8 + 621.3.041

DOI: 10.14529/engin220201

ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ АКТИВНОЙ ЧАСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

В.В. Варкентин, А.И. Согрин, В.Б. Федоров

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

В данной работе описан процесс проектирования конструкции активной части электрической машины тягового двигателя для беспилотных летательных аппаратов и оценка его массово-геометрических и энергетических параметров.

Целью работы является повышение удельной мощности электродвигателя путем снижения его массы при помощи замены электротехнической меди для обмоток якоря на электротехнический алюминий без увеличения габаритных размеров конструкции.

В разделе «Описание проектируемой конструкции» приведен эскиз проектируемой конструкции активной части электрической машины тягового двигателя. В качестве тягового двигателя рассматривается трехфазный вентильный электропривод, относящийся к бесколлекторным двигателям постоянного тока. Также здесь описаны требования к параметрам проектируемой активной части электрической машины.

В разделе «Расчет модели конструкции» приведена методика расчета массово-геометрических характеристик и электромагнитных параметров проектируемой конструкции активной части электрической машины тягового двигателя и его математическое описание.

В разделах «Проектирование конструкции» и «Основные результаты» приведены результаты расчетов двух вариантов конструкции – с медной обмоткой и с алюминиевой обмоткой, выбраны материалы компонентов, а также описаны методы, при помощи которых выполнялась доработка этих конструкций, и способы изготовления некоторых компонентов конструкции.

В результате работы был достигнут эффект снижения массы проектируемой конструкции в 1,16 раза без увеличения габаритных размеров при сохранении значения КПД выше 90 % и при сохранении значения полезной мощности в 2,6 кВт. Также были оценены общие электрические потери разработанных конструкций, которые при равенстве сопротивлений обмоток и рабочего тока оказались разными.

Ключевые слова: БДПТ, БПЛА, вентильный двигатель

Введение

При проектировании электродвигателей для беспилотных летательных аппаратов, как правило, основной задачей является разработка активной части электрической машины, имеющей минимальные массогабаритные показатели. От эффективности работы электрической машины зависят габариты и масса источника питания, а также полупроводниковый преобразователь. Поэтому наряду с требованиями минимальной массы должны выдвигаться требования максимальной эффективности электромеханического преобразования энергии в разрабатываемой машине.

Вместе с тем указанные требования, как правило, противоречат друг другу: стремление уменьшить габариты и массу машины приводит к увеличению электромагнитных нагрузок ее активных частей, и, как следствие, к более интенсивным потерям в них. Поиск путей снижения массы и габаритов электрической машины при сохранении высоких энергетических показателей представляет собой важную научную и инженерную проблему [1, 2]. Частично проблема решается применением новейших активных материалов: электротехнических сталей с низким уровнем магнитных потерь, высококоэрцитивных постоянных магнитов, проводниковых материалов с высокой степенью очистки [3, 4]. Другим перспективным путем представляется совершенствова-

Расчет и конструирование

ние технологии изготовления электрической машины, использование новейшего высокотехнологичного оборудования при изготовлении ее частей [5].

В настоящей работе показано одно из возможных решений сформулированной выше проблемы в рамках разработки высокоиспользованного тягового электродвигателя для беспилотного летательного аппарата.

1. Описание проектируемой конструкции

В качестве объекта проектирования используется активная часть электрической машины вентильного двигателя с возбуждением от высококоэрцитивных постоянных магнитов. Данный тип двигателей характеризуется высокими удельными мощностными и силовыми показателями, простотой конструкции, значительным ресурсом [6, 7]. Вентильный двигатель с постоянными магнитами на роторе не потребляет энергии на возбуждение, не имеет скользящего контакта, менее чувствителен к действию реакции якоря, чем обычные машины. В настоящее время именно такой тип двигателя все больше применяется при проектировании беспилотных летательных аппаратов [8–10].

Эскиз активной части двигателя приведен на рис. 1. С целью максимального использования активного объема электрическая машина выполнена многополюсной с дробной зубцовой якорной обмоткой, число пазов которой на полюс и фазу меньше единицы. При этом обмотка каждой фазы состоит из ряда соединенных в определенной последовательности катушек, каждая из которых охватывает один зубец статора. Такая конструкция обмотки упрощает технологию ее изготовления [11], увеличивает коэффициент заполнения паза обмоточным проводом и самое главное позволяет уменьшить длину лобовых частей, что сокращает расход материала токопроводов, а, следовательно, массу и габариты машины [12].

Машина имеет обращенную конструкцию, т.е. есть вращается ее наружная часть, являющаяся индуктором, а внутренняя, несущая обмотку якоря, остается неподвижной [13]. Это облегчает крепление постоянных магнитов, поскольку в данном случае они прижимаются к сердечнику ротора центробежной силой [14, 15].

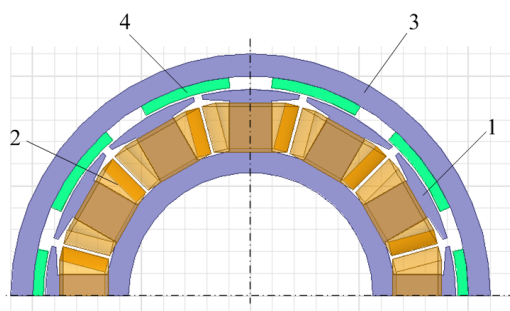


Рис. 1. Эскиз активной части электрической машины вентильного электропривода

Статор двигателя состоит из сердечника 1, который с целью снижения потерь от вихревых токов набран из тонких листов электротехнической стали. Обмотка якоря 2 размещается в пазах на наружной поверхности статора. Пазы полузакрытые трапециевидальной формы. Выбранная форма паза обеспечивает параллельность граней зубца, что делает его нагрузку магнитным полем равномерной по высоте и позволяет уменьшить расход активной стали [16]. Малое открытие паза снижает пульсации магнитного поля в рабочем воздушном зазоре, что способствует снижению добавочных потерь.

Ротор состоит из сердечника 3 из магнитомягкого материала, на который установлены полюса 4 из постоянных магнитов, намагниченных в радиальном направлении.

Далее, в разделе «Проектирование» будут рассмотрены два варианта двигателя: с медной и с алюминиевой обмоткой на статоре. Указанные варианты сравниваются по массогабаритным показателям при одинаковом уровне электрических потерь в обмотках. В табл. 1 приведены требования к проектируемой конструкции активной части электрической машины вентильного электропривода.

Таблица 1

Требования к параметрам электрического двигателя

	Напряжение питания, В	Полезная мощность на валу, Вт	Частота вращения, об./мин	КПД в номинальном режиме	Масса, кг
Значение параметра	36	2600	7000	не менее 0,9	не более 1,5

2. Расчет модели конструкции

Для определения основных геометрических размеров активной части электрической машины необходимо определить электромагнитную мощность, используя формулу (1):

$$P_{ЭМ} = \frac{1+\eta}{2\eta} \cdot P_2, \quad (1)$$

где η – коэффициент полезного действия двигателя, P_2 – полезная мощность на валу.

Затем по формуле (2) определяется предварительное значение средней ЭДС электродвигателя:

$$E_{ср} = \frac{1+\eta}{2} \cdot U', \quad (2)$$

где $U' = U - \Delta U_K$, ΔU – напряжение питания, $\Delta U_K \approx 0,5$ В – падение напряжения на ключах инвертора. Тогда предварительное значение среднего тока двигателя определяется выражением (3), а действующее значение тока двигателя (без учета индуктивности) – выражением (4):

$$I_{ср} = \frac{P_{ЭМ}}{E_{ср}}, \quad (3)$$

$$I_D = I_{ср} \cdot \frac{\sqrt{1+k_0 \left(\frac{E_{ср}}{U'}\right)^2 - 2\frac{E_{ср}}{U'}}}{1 - \frac{E_{ср}}{U'}}. \quad (4)$$

Здесь $k_0 \approx 1,005$ для двухполупериодной 120-градусной коммутации и синусоидальной ЭДС.

Далее, по формуле (5) оценивается действующее значение тока фазы двигателя:

$$I_{Ф} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_D. \quad (5)$$

Наружный диаметр якоря предварительно определяется из выражения (6) машинной постоянной, связывающей главные геометрические размеры машины с электромагнитными нагрузками:

$$C = \frac{D_a^3 \lambda_k n}{P_{ЭМ}} = \frac{6,1}{\chi k_L \alpha_\delta k_{об} A B_\delta}. \quad (6)$$

Здесь D_a – наружный диаметр якоря (статора); $\lambda_k = l_\delta / D_a$, l_δ – расчетная осевая длина воздушного зазора; n – номинальная частота вращения; χ – коэффициент, зависящий от формы кривой ЭДС и способа коммутации; k_L – коэффициент, учитывающий влияние индуктивности обмотки якоря (предварительно выбирается из диапазона 0,5–1); α_δ – коэффициент расчетной полюсной дуги (предварительно выбирается из диапазона 0,68–0,78); $k_{об}$ – обмоточный коэффициент, учитывающий укорочение шага и распределение обмотки якоря по пазам [17]; A – линейная нагрузка якоря (для машин средней мощности с самовентиляцией при плотности тока в обмотке якоря $j \approx 4-10$ А/мм², $A = 15-30$ кА/м, для машин с принудительным воздушным охлаждением при $j \approx 10-16$ А/мм², $A = 20-50$ кА/м [15]); B_δ – индукция в воздушном зазоре (обычно принимается $B_\delta < 0,75B_r$ [18], где B_r – остаточная индукция материала магнита).

В электрической машине с дробной однозубцовой обмоткой и числом пазов на полюс и фазу меньше единицы число пар полюсов p не может быть выбрано произвольно и определяется числом зубцов z статора. Магнитодвижущая сила таких обмоток содержит две сильнейшие гармоники с близкими амплитудами, вращающиеся в противоположные стороны [19]. В качестве рабочей может быть использована любая из них, что и определяет выбор числа полюсов, поскольку по-

Расчет и конструирование

люсность ротора и основной гармоники поля статора должны совпадать. Число зубцов статора должно быть кратно числу фаз, соответственно выражению (7):

$$z = 2km, \quad (7)$$

где m – число фаз обмотки якоря, $k = 1, 2, \dots$ выбирается из условия выполнимости паза и желаемого числа полюсов машины.

Наилучшие показатели получаются у машин при $z > 2p$ [12]. Поэтому число полюсов ротора определяется по соотношению (8):

$$p = \frac{z}{2} - 1. \quad (8)$$

Частота перемагничивания оценивается выражением (9), а затем определяется – допустимо ли полученное значение для выбранных материалов:

$$f = \frac{n \cdot p}{60}. \quad (9)$$

Для определения основных размеров магнитной системы используется математическое описание двигателя, связывающее размеры участков магнитной цепи с остальными параметрами машины.

Эскиз пазово-зубцовой зоны статора двигателя приведен на рис. 2. Большая ширина паза статора определяется соотношением (10), а меньшая – соотношением (11):

$$d_1 = \frac{\pi(D_a - 2(h_{ш} + h_{кз}))}{z} - a_z, \quad (10)$$

$$d_2 = \frac{\pi(D_b + 2h_c)}{z} - a_z, \quad (11)$$

где $h_{ш}$ – высота шлица паза статора, $h_{кз}$ – высота коронки зубца; D_b – внутренний диаметр машины, который подбирается исходя из требуемой площади паза.

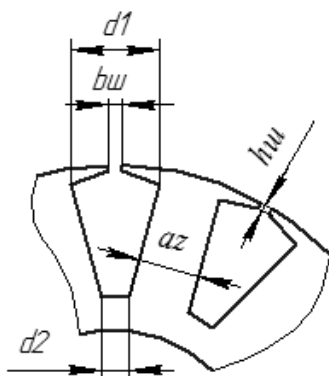


Рис. 2. Эскиз активной части электрической машины вентильного электропривода

Односторонний вылет лобовых частей l_l определяется выражением (12), полная осевая длина статора l_c – выражением (13), ширина магнита b_m – выражением (14):

$$l_l = \left(\frac{\pi(D_a - 2(h_{ш} + h_{кз}))}{z} - a_z \right) / 2, \quad (12)$$

$$l_c = l_a + l_3 + 2l_l, \quad (13)$$

$$b_m = \frac{\pi(D_a + 2\delta)\alpha_\delta}{2p \cdot 1,04}. \quad (14)$$

Далее, по формуле (15) определяется предварительное значение потока в нейтральном сечении магнита в соответствии с предположением, что магнитное сопротивление стальных участков магнитной цепи равно нулю [20]:

$$\Phi'_m = \frac{H_c \mu_0 l_m b_m h_m}{\delta k_\mu + h_m}, \quad (15)$$

где k_μ – коэффициент насыщения магнитной цепи, H_c — коэрцитивная сила магнита, μ_0 – магнитная проницаемость воздуха.

Далее выполняется расчет магнитной цепи, по которой замыкается поток Φ_m , определяются магнитные сопротивления всех ее участков. При необходимости корректируются размеры участков магнитной системы таким образом, чтобы индукции в них не превосходили заданных значений.

Индукция в спинке ротора B_p определяется по формуле (16), в зубце статора B_z – по формуле (17), в спинке статора B_c – по формуле (18):

$$B_p = \frac{\Phi'_m}{2h_p l_p}, \quad (16)$$

$$B_z = \frac{\Phi'_m \cdot 2p}{z a_z l_a k_c}, \quad (17)$$

$$B_c = \frac{\Phi'_m}{2h_c l_a k_c}, \quad (18)$$

где k_c – коэффициент заполнения сердечника статора материалом.

По значениям магнитной индукции в сечениях участков магнитной цепи определяются напряженности магнитного поля в этих участках (на каждом участке поле принимается однородным и неизменным по длине участка) по кривой намагничивания для выбранных материалов статора и ротора.

Длина средней магнитной линии в спинке ротора l_p определяется выражением (19), длина средней магнитной линии в зубце l_z – выражением (20), длина средней магнитной линии в спинке статора – выражением (21):

$$l_p = \left(h_p + \frac{(D_n - h_p)\pi}{2p} \right) 0,5, \quad (19)$$

$$l_z = (D_a - D_b - 2h_c) 0,5, \quad (20)$$

$$l_c = \left(h_c + (D_b + h_c) \frac{\pi}{z} \right) 0,5, \quad (21)$$

где $D_n = D_a + 2\delta + 2h_m + 2h_p$ – наружный диаметр двигателя.

Магнитное сопротивление спинки ротора $R_{\mu p}$ определяется по формуле (22), магнитное сопротивление зубца $R_{\mu z}$ – по формуле (23), магнитное сопротивление спинки статора $R_{\mu c}$ – по формуле (24), магнитное сопротивление воздушного зазора $R_{\mu \delta}$ – по формуле (25) [20]:

$$R_{\mu p} = \frac{H_p l_p}{\Phi'_m}, \quad (22)$$

$$R_{\mu z} = \frac{H_z \cdot l_z \cdot z}{\Phi'_m \cdot 2p}, \quad (23)$$

$$R_{\mu c} = \frac{H_c l_c}{\Phi'_m}, \quad (24)$$

$$R_{\mu \delta} = \frac{\delta}{\mu_0 l_\delta \tau}, \quad (25)$$

где H_p – напряженность магнитного поля в спинке ротора; H_z – напряженность магнитного поля в зубце статора; H_c – напряженность магнитного поля в спинке статора; $\tau = \pi (D_a + 2\delta) / 2p$ – полюсное деление.

Магнитное сопротивление постоянного магнита определяется по методике, изложенной в [20]. Сопротивление магнита основному магнитному потоку R_M определяется по формуле (26):

$$R_M = \frac{1}{\Lambda_M}, \quad (26)$$

где Λ_M – полезная проводимость.

Расчет и конструирование

Полное магнитное сопротивление основному магнитному потоку R_μ определяется по формуле (27), а полезный магнитный поток Φ_m (с учетом магнитного сопротивления материала сердечников статора и ротора) – по формуле (28):

$$R_\mu = R_{\mu p} + R_{\mu z} + R_{\mu c} + R_{\mu \delta} + R_M, \quad (27)$$

$$\Phi_m = \frac{H_c h_m}{R_\mu}. \quad (28)$$

Полученное в результате расчета магнитной цепи значение полезного потока Φ_m сравнивается с рассчитанным по выражению (15), если отклонение превышает 5 %, значение Φ'_m должно быть скорректировано, а расчет магнитной цепи выполнен повторно. В ходе расчета магнитной цепи также корректируются размеры ее участков, причем высота спинки статора, ширина зубца, высота спинки ротора выбираются таким образом, чтобы с одной стороны исключить их насыщение, с другой – обеспечить размещение обмотки якоря в пазах.

Далее выполняется определение обмоточных данных. Число витков фазы W_ϕ определяется по формуле (29) [18], а число витков на зубец W_z – по формуле (30):

$$W_\phi = \frac{5,75 \cdot E_{cp}}{p \cdot n \cdot k_{об} \Phi_m}, \quad (29)$$

$$W_z = \frac{W_\phi \cdot m}{z}. \quad (30)$$

Вычисленное значение параметра W_z округляется до целого в большую сторону, а затем пересчитывается параметр W_ϕ .

Сечение эффективного проводника предварительно определить из условия размещения обмотки в пазу в соответствии с выражением (31):

$$q' = \frac{Q_m}{2W_z}, \quad (31)$$

где $Q_m = S_\Pi k_M$ – площадь материала токопровода одного паза, S_Π – площадь паза, предназначенная для размещения обмотки, k_M – коэффициент заполнения паза материалом токопровода (k_M обычно принимают равным 0,3–0,35). Площадь паза определяется по его эскизу, показанному на рис. 2, в соответствии с формулой (32):

$$S_\Pi = \frac{d_1 + d_2}{2} (l_z - h_{ш} - h_{кз}). \quad (32)$$

Традиционно, эффективный проводник набирается из нескольких элементарных – сечение элементарного проводника определяется по формуле (33), а затем определяется окончательное сечение эффективного проводника.

$$q_{эл} = \frac{q'}{n_{эл}}, \quad (33)$$

где $n_{эл}$ – число элементарных проводников.

Затем проводится проверка плотности тока в проводниках обмотки якоря J , вычисляемой по формуле (34). Если плотность тока J превышает допустимое значение, то выполняется корректировка размеров электрической машины.

$$J = \frac{I_\phi}{q}. \quad (34)$$

После определения размеров электрической машины и электромагнитных параметров выполняется расчет массы ее компонентов. Масса сердечника статора m_{cc} определяется соотношением (35), масса обмотки якоря m_o – соотношением (37), масса сердечника ротора m_{cp} – соотношением (38), масса магнитов m_m – соотношением (39):

$$m_{cc} = \left(\frac{\pi}{4} (D_a^2 - D_b^2) - S_\Pi^H z \right) l_a k_c \rho_c, \quad (35)$$

где ρ_c – плотность материала, S_Π^H – полная площадь паза, определяемая выражением (36):

$$S_{\Pi}^{\Pi} = S_{\Pi} + \frac{d_1 + b_{\text{ш}}}{2} h_{\text{КЗ}}, \quad (36)$$

где $b_{\text{ш}}$ – ширина шлица паза статора;

$$m_o = q \cdot l_{\text{ср}} \cdot W_{\phi} \cdot 3 \cdot \rho_M, \quad (37)$$

где ρ_M – плотность материала токопровода, $l_{\text{ср}} = 2(l_a + l_l + \tau_{\text{ср}})$ – длина среднего витка, $\tau_{\text{ср}} = (D_a - l_z)\pi/z$ – зубцовое деление в середине высоты паза;

$$m_{\text{ср}} = \frac{\pi}{4} (D_n^2 - (D_n - 2h_p)^2) l_p \rho_c, \quad (38)$$

$$m_M = 2 \cdot p \cdot l_M \cdot b_M \cdot h_M \cdot \rho_{\text{Маг}}, \quad (39)$$

где $\rho_{\text{Маг}}$ – плотность материала магнитов.

Масса статора и масса ротора определяется выражениями (40–41), а полная масса активной части электрической машины – выражением (42):

$$m_c = m_{\text{сс}} + m_o, \quad (40)$$

$$m_p = m_{\text{ср}} + m_M, \quad (41)$$

$$m = m_c + m_p. \quad (42)$$

3. Проектирование конструкции

На основании приведенного в разделе «Методология» математического описания были вычислены массово-геометрические параметры спроектированной активной части электрической машины, приведенные в табл. 2.

Таблица 2

Массово-геометрические характеристики

Параметр	Значение
Число пар полюсов	5,00
Число зубцов статора	12,00
Наружный диаметр, мм	111,00
Внутренний диаметр, мм	23,50
Диаметр расточки статора, мм	93,90
Диаметр расточки ротора, мм	94,90
Осевая длина активной части, мм	20,00
Осевая длина по выступам лобовых частей, мм	36,20
Высота магнита, мм	3,00
Коэффициент полусной дуги	0,68
Высота спинки ротора, мм	5,00
Высота спинки статора, мм	5,00
Ширина зубца, мм	7,00
Ширина шлица паза статора, мм	2,00
Высота шлица паза статора, мм	1,00
Высота коронки зубца, мм	2,00
Глубина паза статора, мм	30,00
Площадь паза статора под обмотку, мм ²	247,00
Число витков в фазе	24,00
Число витков на зубец	6,00
Диаметр провода обмотки статора, мм	0,90
Число элементарных проводников	15,00
Масса активной части двигателя, кг	1,40

При расчетах были выбраны следующие материалы для компонентов активной части электрической машины: сердечник статора выполнен из высококачественной холоднокатаной электротехнической стали марки 2412 с толщиной листа 0,28 мм. Сердечник ротора выполнен из кон-

Расчет и конструирование

струкционной стали марки Ст. 3. Постоянные магниты выполнены из сплава NdFeB, остаточная индукция которого составляет $B_r = 1,1$ Тл, а коэрцитивная сила $H_c = 850$ кА/м. В качестве материала для токопроводов была выбрана электротехническая медь.

В результате расчетов также были определены значения индукции магнитного поля в участках магнитной системы активной части электрической машины. Результаты расчетов приведены в табл. 3. Полезный поток составил $\Phi_m = 2,55 \cdot 10^{-4}$ Вб.

Таблица 3

Индукция магнитного поля

	Спинка ротора (p)	Зубец (z)	Спинка статора (c)	Воздушный зазор (δ)	Магнит (m)
Размер участка (l), мм	5,0	30,0	5,0	0,5	3,0
Индукция в участке (B), Тл.	1,2	1,6	1,4	0,65	0,7

При расчетах было учтено, что, с одной стороны, с увеличением числа полюсов за счет уменьшения требуемого сечения спинки ротора улучшается использование объема машины, а с другой стороны – увеличивается частота перемагничивания магнитопровода машины и растут магнитные потери. Поэтому количество зубцов статора, определяемое по формуле (7), было выбрано равным $z = 12$. Частота перемагничивания, вычисленная по формуле (9) при этом составила $f = 583$ Гц, что допустимо для выбранных материалов.

После выполнения описанного расчета конструкции была выполнена ее доработка. Для уменьшения массы активной части электрической машины требуется изготовить обмотку с помощью современного устройства 3D-печати. В данном случае, во-первых, можно не разбивать эффективный проводник на элементарные, что уменьшает площадь проводниковой изоляции. Во-вторых, обмотка может быть изготовлена очень точно, что позволяет не считаться с возможной неплотностью укладки проводников, как это обычно делают при изготовлении стандартных обмоток. В третьих, межкатушечные соединения могут располагаться в удобном для этого месте, например в верхней части зубца, не занимая при этом полезной площади паза. Указанные факторы снижают требуемую площадь паза и позволяют уменьшить объем статора и, следовательно, его массу.

При этом был заранее определен способ установки такой обмотки на зубцы сердечника якоря. Зубцы выполняются отъемными – в нижней части предусмотрены элементы замкового соединения со спинкой статора, как показано на рис. 3. Сердечник статора при этом собирать в единую конструкцию после установки обмотки на зубцы. При этом однако неизбежны замыкания листов в местах примыкания зубцов к спинке статора и дополнительные потери от вихревых токов. Чтобы минимизировать эти факторы необходимо склеить между собой пластины при помощи клеящего вещества, обладающего диэлектрическим свойством.

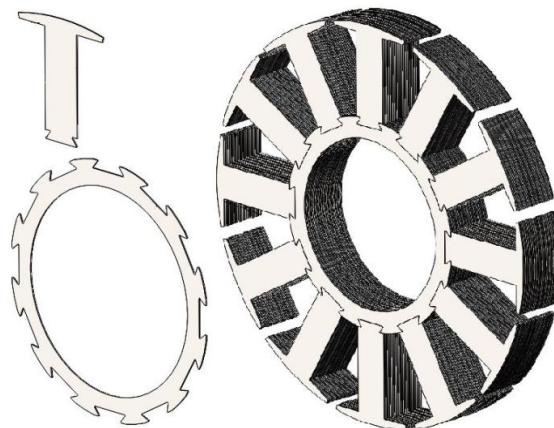


Рис. 3. Сборка сердечника статора

Дальнейший анализ конструкции электрической машины проводился с помощью программного средства ANSYS Maxwell, предназначенного для расчета электромагнитных устройств (в

том числе для моделирования магнитного поля методом конечных элементов), одновременно с 3D моделированием геометрии машины в средах АСКОН Компас и SolidWorks.

Параметры электрической машины, определенные ранее, сносились в модуль RmXprt программы Maxwell, который предназначен для аналитического расчета вращающихся электрических машин. При этом сечение эффективного проводника принималось равным полученному ранее значению, но проводник не подразделялся на элементарные. Минимальное расстояние между проводниками катушки принималось, с одной стороны, достаточным для выполнения изоляции, с другой – исходя из возможностей 3D принтера. Это расстояние было выбрано равным 0,4 мм. Зазоры между катушкой и стенками паза и зазоры между катушками также принимались равными 0,4 мм. Для сохранения линейной нагрузки якоря в допустимых пределах было решено не изменять наружный диаметр статора. Коррекция размеров паза, таким образом, проводилась за счет изменения внутреннего диаметра машины. При этом укорочение длины средней силовой линии в зубце (ферромагнитном участке магнитной цепи с наибольшим падением магнитного потенциала) привело к увеличению основного магнитного потока. Это позволило, с одной стороны, уменьшить высоту магнита (магнит был уменьшен на 0,5 мм), с другой – уменьшить число витков в фазе (число витков было уменьшено до 20). Активная длина машины также была уменьшена до 14 мм. Уточнение тока фазы позволило при сохранении плотности тока в проводниках обмотки статора несколько снизить их сечение (эквивалентный диаметр проводника был уменьшен с 3,6 мм до 3,15 мм).

В результате внутренний диаметр статора удалось увеличить с 23,5 мм до 56 мм. Площадь паза статора под обмотку при этом была уменьшена с 247 мм² до 115 мм². Коэффициент заполнения паза электротехнической медью увеличился с 50 % до 76 %, а масса активной части двигателя снизилась до 0,87 кг.

Затем была выполнена замена медной обмотки на алюминиевую. Алюминий обладает гораздо меньшей плотностью: 2700 кг/м³ против 8900 кг/м³ у меди. Замена проводилась при условии примерного равенства полных потерь в машине. Поскольку удельное сопротивление алюминия в 1,5 раза больше удельного сопротивления меди, сечение провода обмотки было увеличено. При одинаковых коэффициентах заполнения паза и примерно одинаковых электрических потерях в обмотках из меди и алюминия сечение алюминиевого провода оказалось равным 11,52 мм² (эквивалентный диаметр провода 3,83 мм²). При этом был уменьшен внутренний диаметр статора за счет увеличения длин ножек его зубцов.

Проверка полученных результатов проводилась после построения трехмерной картины магнитного поля в объеме машины. Пример распределения магнитного поля в объеме электрической машины с медной обмоткой для одного из моментов времени приведен на рис. 4.

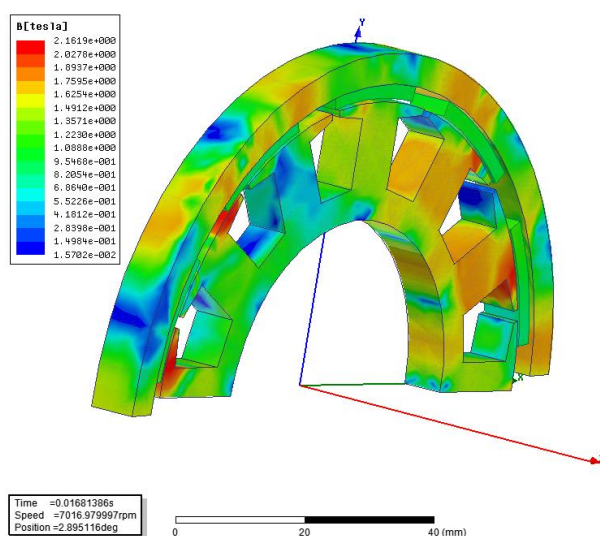


Рис. 4. Распределение магнитного поля в объеме электрической машины

Расчет и конструирование

4. Основные результаты

В результате работы была спроектирована конструкция активной части электрической машины вентильного электродвигателя в двух вариантах – с медной и с алюминиевой обмотками. Основные параметры и показатели спроектированных объектов приведены в табл. 4. На рис. 5 показаны трехмерные модели конструкции, а на рис. 6 – основные размеры магнитной системы спроектированной электрической машины.

5. Выводы

В ходе работы были спроектированы две конструкции активных частей электрических машин вентильного электропривода, предназначенного для применения в составе беспилотных летательных аппаратов. При этом оба электродвигателя имеют одинаковые габаритные размеры, однако их масса отличается в 1,16 раз за счет применения электротехнического алюминия взамен медного в качестве токопроводов. Однако такая замена привела к снижению КПД (на 2 %) электрической машины, что является допустимым, так как его значение выше требуемого 0,9. При этом полезная мощность на валу практически совпадает, что говорит о повышении удельной мощности конструкции.

Таблица 4

Основные параметры и показатели

Наименование параметра	Значение параметра	
	Медь	Алюминий
Напряжение питания, В	32,00	32,00
Полезная мощность на валу, Вт	2691,00	2627,00
Номинальная частота вращения, об/мин	7017,00	7185,00
Момент на валу, Нм	3,66	3,50
Действующий ток фазы, А	100,00	97,00
Средний потребляемый ток, А	99,60	97,50
Электрические потери в обмотке, Вт	105,26	153,8
Магнитные потери в сердечнике статора, Вт	45,00	49,50
Потери в роторе, Вт	65,50	68,40
Полные потери, Вт	214,56	271,50
Коэффициент полезного действия, %	92,64	91,00
Число пар полюсов	5,00	5,00
Число зубцов статора	12,00	12,00
Наружный диаметр, мм	110,00	110,00
Внутренний диаметр, мм	56,00	43,00
Диаметр расточки статора, мм	94,00	94,00
Диаметр расточки ротора, мм	95,00	95,00
Осевая длина активной части, мм	14,00	14,00
Осевая длина по выступам лобовых частей, мм	27,09	29,17
Высота магнита, мм	2,50	2,50
Коэффициент полюсной дуги	0,68	0,68
Высота спинки ротора, мм	5,00	5,00
Высота спинки статора, мм	5,00	5,00
Ширина зубца, мм	9,50	9,50
Ширина шлица паза статора, мм	2,00	2,00
Высота шлица паза статора, мм	1,00	1,00
Высота коронки зубца, мм	2,00	2,00
Глубина паза статора, мм	14,00	20,50
Площадь паза статора под обмотку, мм ²	114,47	158,37
Число витков в фазе	20,00	20,00
Число витков на зубец	5,00	5,00
Эквивалентный диаметр провода обмотки статора, мм	3,15	3,83
Число элементарных проводников	1,00	1,00
Масса сердечника ротора, кг	0,21	0,21

Окончание табл. 4

Наименование параметра	Значение параметра	
	Медь	Алюминий
Масса магнитов, кг	0,06	0,06
Масса сердечника статора, кг	0,30	0,35
Масса обмотки, кг	0,31	0,13
Полная масса активной части двигателя, кг	0,88	0,75

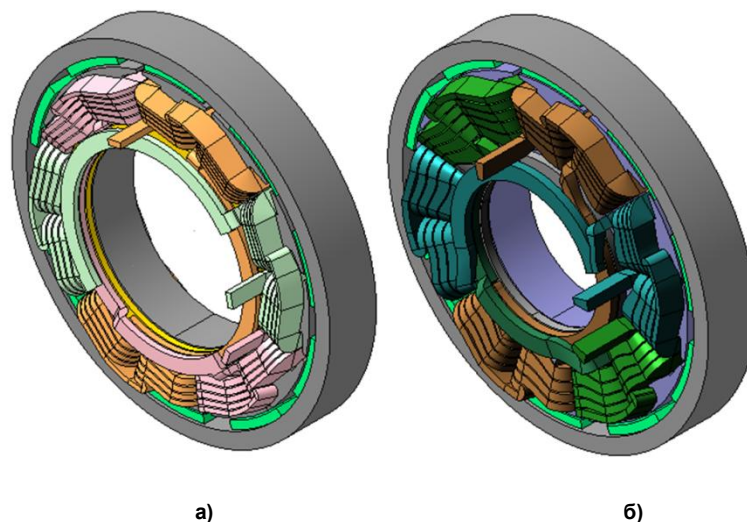


Рис. 5. 3D-модели конструкции электрической машины с:
а – медной обмоткой; б – с алюминиевой обмоткой

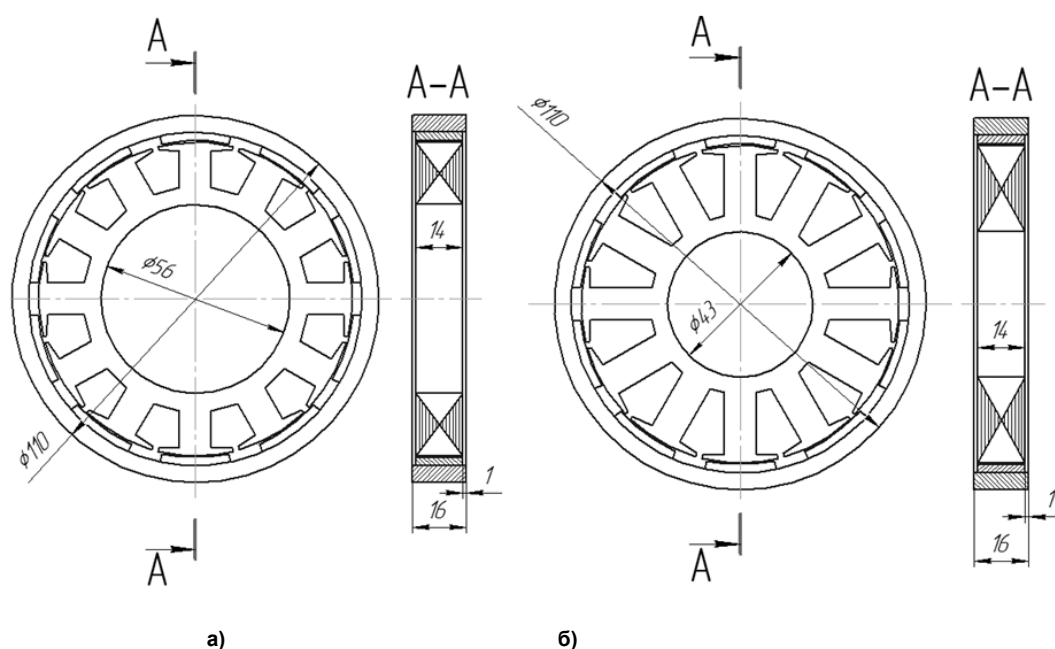


Рис. 6. Основные размеры конструкции электрической машины
с а – медной обмоткой; б – с алюминиевой обмоткой

6. Обсуждение и применение

Приведенный расчет конструкции показал, что потери в двух рассматриваемых двигателях оказались разными. Причем, несмотря на одинаковое сопротивление обмоток постоянному току и примерно равные токи, разными получились электрические потери. Вероятно, это связано с перераспределением токов в проводниках обмотки якоря в результате эффекта вытеснения токов.

Расчет и конструирование

Проявлением этого эффекта является уменьшение эффективного сечения проводника и, следовательно, повышение электрического сопротивления обмотки. Выраженность эффекта вытеснения тока зависит от частоты тока, высоты проводника и от того, насколько глубоко проводник погружен в ферромагнетик. В электрической машине с алюминиевой обмоткой паз статора более глубокий, а нижние проводники узкие и высокие, что может усилить выраженность указанного эффекта.

Достигнутые результаты являются важными, так как при использовании электродвигателей с алюминиевой обмоткой в качестве тяговых двигателей беспилотных летательных аппаратов будет увеличена максимальная масса полезной нагрузки. При этом габариты электродвигателей остаются такими же, как и с медной обмоткой, что расширяет область их применения.

Литература

1. Park, J.S. Design and implementation of BLDC motor with integrated drive circuit. *International / J.S. Park, K.D. Lee // Journal of Power Electronics and Drive System*. – 2017. – Vol. 8, № 3, P. 1109–1116. DOI: 10.11591/ijpeds.v8i3.pp1109-1116.

2. Ping, C. Fast Torque Optimization Technology of Brushless Motor Using ANSYS Finite Element Software and Maxwell2D. / C. Ping, X. Chang // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2021 – Vol. 2143. – № 1-012036. DOI: 10.1088/1742-6596/2143/1/012036.

3. Chen, W. Analytical Comparison Between Ferrite Core and Steel Laminations Losses of Multi-Polar Brushless DC Motor. / W. Chen, C. Lin, C. Chen // *IECON 2007 – 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. – 2007. P. 1192–1197. DOI: 10.1109/IECON.2007.4460318.

4. Huang, C.-L. Comparison of High Speed Permanent Magnet Machine Sensorless Drive using Trapezoidal BLDC and Sinusoidal FOC under Insufficient PWM Frequency / C.-L. Huang, G.-R. Chen, S.-C. Yang et al. // *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. – 2019. – P. 321–325, DOI: 10.1109/ECCE.2019.8912495.

5. Simpson, N. Additive Manufacturing of Shaped Profile Windings for Minimal AC Loss in Electrical Machines / N. Simpson, P.H. Mellor // *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. – 2018. – P. 5765–5772, DOI: 10.1109/ECCE.2018.8557999.

6. Carev, V. Multilayer Brushless DC Motor for Heavy Lift / V. Carev, J. Roháč, M. Šipoš et al. // *Drones.Energies*. – 2021, 14, 2504. DOI: 10.3390/en14092504.

7. Ekmen, Ş. A BLDC motor drive with four switch three phase inverter / Ş. Ekmen, B. Fincan, M. Imeryuz // *IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*. – 2016. – P. 804–808, DOI: 10.1109/ICRERA.2016.7884447.

8. Solomon, O. Model Reference Adaptive Control of a Permanent Magnet Brushless DC Motor for UAV Electric Propulsion System / O. Solomon // *IECON 2007 – 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. – 2007. – P. 1186–1191. DOI: 10.1109/IECON.2007.4460304.

9. Koteich, M. A real-time observer for UAV's brushless motors / M. Koteich, T.L. Moing, A. Janot // *IEEE 11th International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their application to Mechatronics*. – 2013. – P. 1–5. DOI: 10.1109/ECMSM.2013.6648964.

10. Ekmen, Ş. A BLDC motor drive with four switch three phase inverter / Ş. Ekmen, B. Fincan, M. Imeryuz // *IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*. – 2016. – P. 804–808. DOI: 10.1109/ICRERA.2016.7884447.

11. Согреин, А.И. Стартер-генератор для дизельной силовой установки / А.И. Согреин, П.О. Шабуров, Б.Д. Шумаков // *Электротехника*. – 2013. – № 10. – С. 25–28.

12. Шевченко, А.Ф. Многополюсные синхронные машины с дробными $q < 1$ зубцовыми обмотками с возбуждением от постоянных магнитов / А.Ф. Шевченко // *Электротехника*. 2007. – № 9. – С. 3–8.

13. *Электротехнические комплексы и системы [Электронный ресурс]: межвузовский научный сборник / Уфимский государственный авиационный технический университет (УГАТУ); отв. ред. Ф.Р. Исмагилов. – Уфа: УГАТУ – 2011. – Режим доступа: URL: https://e-library.ugatu.ru/dl/lib_net_r/Elektrotekhn_kompl_sist_2011.pdf (дата обращения: 29.04.2022).*

14. Ледовский, А.Н. Электрические машины с высококоэффициентными постоянными магнитами / А.Н. Ледовский. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 168 с.

15. Бут, Д.А. *Бесконтактные электрические машины: учебное пособие* / Д.А. Бут. – М.: Высшаяшк., 1990. – 416 с.
16. Копылов, И.П. *Проектирование электрических машин* / И.П. Копылов. – Кн. 2: учеб. для вузов по спец. «Электромеханика»: в 2 кн. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 382 с.
17. Копылов, И.П. *Проектирование электрических машин* / И.П. Копылов. – Кн. 1: учеб. для вузов по спец. «Электромеханика»: в 2 кн. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 462 с.
18. Лифанов, В.А. *Расчет электрических машин малой мощности с возбуждением от постоянных магнитов: учебное пособие к курсовому и дипломному проектированию* / В.В. Лифанов. – Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 2003. – 169 с.
19. Шевченко, А.Ф. *Анализ магнитодвижущих сил дробных зубцовых обмоток электрических* / А.Ф. Шевченко, Т.В. Честюнина // *Электротехника*. – 2009. – № 12. – С. 3–7.
20. Воронин, С.Г. *Разработка специализированных механизмов с бесконтактными моментными двигателями постоянного тока* / С.Г. Воронин, С.А. Петрищев и др. – Отчет о НИР. № государственной регистрации 82/67.

Варкентин Виталий Владимирович, аспирант, кафедра «Летательные аппараты», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, varkentinvv@susu.ru

Согрин Андрей Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Летательные аппараты», Южно-Уральский государственный университет, sogrinai@susu.ru

Федоров Виктор Борисович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Летательные аппараты», начальник центра ракетно-космической техники имени академика В.П. Макеева, Южно-Уральский государственный университет, vbf64@mail.ru

Поступила в редакцию 16 мая 2022 г.

DOI: 10.14529/engin220201

STRUCTURE DESIGN OF THE ACTIVE PART OF THE ELECTRIC MACHINE OF THE TRACTION MOTOR OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

V.V. Varkentin, varkentinvv@susu.ru

A.I. Sogrin, sogrinai@susu.ru

V.B. Fedorov, vbf64@mail.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The article describes the process of designing the active part of a traction electric machine for unmanned aerial vehicles and evaluating its mass-geometric and electrical parameters.

The purpose of the work is to increase the specific power of the electric motor by reducing its mass when replacing electrical copper for armature windings with electrical aluminum without increasing the overall dimensions of the structure.

In the section “Description of the design under development” a draft design of the active part of the traction electric machine is given. As a traction motor, a three-phase valve electric drive is used, which belongs to the class of brushless DC motors. High requirements are also imposed on the parameters of the designed active part of the electric machine.

The section “Calculation of the design model” provides methods for calculating the geometric characteristics and electromagnetic parameters of the designed traction motor structure, and their mathematical description.

The sections “Design project” and “Main results” present the results of calculations for two design options – with a copper winding and with an aluminum winding, the materials of the components are selected, the methods of manufacturing some components, as well as the main methods by which these designs were finalized.

As a result of the work, the effect of reducing the mass of the designed structure by 1.16 times was achieved without increasing the overall dimensions while maintaining the efficiency value above 90 % and maintaining the net power value of 2.6 kW. Also, studies were carried out on the total electrical losses of structures with the same winding resistance and operating current, which turned out to be different.

Keywords BLDC, UAV, brushless motor

References

1. Park J.S., Lee K.D. Design and implementation of BLDC motor with integrated drive circuit. International. *Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 2017, vol. 8, no. 3, pp. 1109–1116. DOI: 10.11591/ijpeds.v8i3.
2. Ping Chen, Xiangran Chang. Fast Torque Optimization Technology of Brushless Motor Using ANSYS Finite Element Software and Maxwell2D. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 2143, no. 1-012036. DOI: 10.1088/1742-6596/2143/1/012036.
3. Chen W., Lin C., Chen C. Analytical Comparison Between Ferrite Core and Steel Laminations Losses of Multi-Polar Brushless DC Motor. *IECON 2007 – 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2007, pp. 1192–1197. DOI: 10.1109/IECON.2007.4460318.
4. Huang C.-L., Chen G.-R., Yang S.-C., Hsu Y.-L. Comparison of High Speed Permanent Magnet Machine Sensorless Drive using Trapezoidal BLDC and Sinusoidal FOC under Insufficient PWM Frequency. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2019, pp. 321–325, DOI: 10.1109/ECCE.2019.8912495.
5. Simpson N., Mellor P.H. Additive Manufacturing of Shaped Profile Windings for Minimal AC Loss in Electrical Machines. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2018, pp. 5765–5772, DOI: 10.1109/ECCE.2018.8557999.
6. Carev V., Roháč J., Šipoš M., Schmirler M. A Multilayer Brushless DC Motor for Heavy Lift Drones. *Energies* 2021, 14, 2504. DOI: 10.3390/en14092504.
7. Ekmen Ş., Fincan B., Imeryuz M. A BLDC motor drive with four switch three phase inverter. *IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 2016, pp. 804–808, DOI: 10.1109/ICRERA.2016.7884447.
8. Solomon O. Model Reference Adaptive Control of a Permanent Magnet Brushless DC Motor for UAV Electric Propulsion System. *IECON 2007 – 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2007, pp. 1186–1191. DOI: 10.1109/IECON.2007.4460304.
9. Koteich M., Moing T.L., Janot A., Defay F. A real-time observer for UAV's brushless motors. *IEEE 11th International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their application to Mechatronics*, 2013, pp. 1–5. DOI: 10.1109/ECMSM.2013.6648964.
10. Ekmen Ş., Fincan B., Imeryuz M. A BLDC motor drive with four switch three phase inverter. *IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 2016, pp. 804–808. DOI: 10.1109/ICRERA.2016.7884447.
11. Sogrin A.I., Shaburov P.O., Shumakov B.D. [Starter Generator for Diesel Power Plant] *Electrical engineering*, 2013, no. 10, pp. 25–28 (in Russ.)
12. Shevchenko A.F. [Multipole Synchronous Machines with Fractional $q < 1$ Tooth Windings with Excitation from Permanent Magnets] *Electrical engineering*, 2007, no. 9, pp. 3–8. (in Russ.)
13. Ismagilov F.R.(ed) [Electrotechnical complexes and systems [Electronic resource]: interuniversity scientific collection] *Ufa: UGATU, 2011*. URL: https://e-library.ufarb.ru/dl/lib_net_r/Elektrotekhn_kompl_sist_2011.pdf. (accessed 29.04.2022)
14. Ledovskiy A.N. *Elektricheskiye mashiny s vysokokoertsitivnymi postoyannymi magnitami* [Electrical machines with high-coercivity permanent magnets] Moscow. Energoatomizdat, 1985, 168 p.
15. But D.A. *Beskontaktnyye elektricheskiye mashiny: uchebnoye posobiye* [Non-contact electrical machines: textbook] Moscow. Higher school., 1990, 416 p.
16. Kopylov I.P. (ed). *Proyektirovaniye elektricheskikh mashin Kn. 2 : Ucheb.dlya vuzov po spets. «Elektromekhanika»: V 2 kn.* [Design of electrical machines Book. 2: Textbook for universities on special. “Electromechanics”: In 2 books]. Moscow. Energoatomizdat, 1993, 382 p.

17. Kopylov I.P (ed). *Proyektirovaniye elektricheskikh mashin Kn. 1 : Ucheb.dlya vuzov po spets. "Elektromekhanika": V 2 kn.* [Design of electrical machines Book. 1: Textbook for universities on special. "Electromechanics": In 2 books]. Moscow. Energoatomizdat, 1993, 462 p.

18. Lifanov V.A. *Raschet elektricheskikh mashin maloy moshchnosti s возбуждением от постоянных магнитов: Uchebnoye posobiye k kursovomu i diplomnomu proyektirovaniyu.* [Calculation of electric machines of low power with excitation from permanent magnets: Textbook for course and diploma design]. Chelyabinsk: SUSU Publishing House, 2003, 169 p.

19. Shevchenko A.F., Chestyunina T.V. [Analysis of Magnetomotive Forces of Fractional Toothed Electric Windings] *Electrical engineering*, 2009, no. 12, pp. 3–7.

20. Voronin S.G., Petrishchev S.A. and others. *Razrabotka spetsializirovannykh mekhanizmov s beskontaktnymi momentnymi dvigatelyami postoyannogo toka.* [Development of specialized mechanisms with non-contact moment DC motors. Research report. No. state registration 82/67.]

Received 16 May 2022

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Варкентин, В.В. Проектирование конструкции активной части электрической машины тягового двигателя для беспилотных летательных аппаратов / В.В. Варкентин, А.И. Согрин, В.Б. Федоров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2022. – Т. 22, № 2. – С. 5–19. DOI: 10.14529/engin220201

FOR CITATION

Varkentin V.V., Sogrin A.I., Fedorov V.B. Structure design of the active part of the electric machine of the traction motor of unmanned aerial vehicles. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2022, vol. 22, no. 2, pp. 5–19. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin220201