

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

УДК 621.313.32

СВЕРХПРОВОДНИКОВАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МАШИНА С КОЛЬЦЕВОЙ ОБМОТКОЙ ЯКОРЯ

Габрелян А.С. *, Иванов Н.С. **, Кондрашов Д.А., Коренчук К.Ю.

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

** e-mail: artgab21@gmail.com*

*** e-mail: n.s.ivanov88@gmail.com*

В настоящее время основной тенденцией развития транспорта является переход на электродвижение, что обусловлено повышенными требованиями к экологичности и КПД транспортных систем. Важнейшим параметром, определяющим перспективность электротранспорта, является удельная мощность электрических машин (генераторов и двигателей). Так, например, для полностью электрического самолета необходимы электрические машины с удельной мощностью свыше 20 кВт/кг [20]. Как показывают исследования, достичь таких показателей удельной мощности возможно только при использовании криогенного охлаждения и применения современных сверхпроводниковых материалов. В статье рассмотрены перспективные схемы полностью сверхпроводниковых электрических машин с высокой удельной мощностью. Представлены методики их расчета, результаты конечно-элементного моделирования и численного эксперимента.

Ключевые слова: переход транспорта на электродвижение, высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) для электротранспорта, кольцевая обмотка якоря, улучшенные массогабаритные показатели ВТСП двигателей и генераторов.

Введение

Одним из перспективных направлений развития современных транспортных систем является создание электротранспорта (ЭТ) [1]. Основное преимущество электрического транспорта — его более высокая, по сравнению с двигателями внутреннего и внешнего сгорания, эффективность и экологичность [2]. В развитых странах ЭТ является основным перевозчиком пассажиров внутри города, на его долю приходится более 50 % всего пассажирооборота [1]. Это ведет к необходимости совершенствования как самого ЭТ, так и его электро-

энергетического оборудования. В литературе, в частности, встречаются сведения о высокоэффективных электрических машинах с использованием постоянных магнитов [22].

После открытия ВТСП с температурой перехода выше температуры кипения жидкого азота в ведущих отечественных и зарубежных научных центрах резко возрос объем разработок нового электротехнического оборудования на основе ВТСП-материалов с улучшенными энергетическими и массогабаритными показателями [3].

Исследования показывают, что, поскольку сверхпроводниковые (СП) материалы обеспечивают плотность тока, в десятки раз превышающую плотность тока медных проводников [18], использование СП-материалов может повысить КПД и увеличить удельную мощность электромеханических преобразователей, что особенно важно для электротранспорта. Это позволит создать более компактные и легкие элементы транспортных систем (наземных, морских, воздушных) и увеличить мощность единичных агрегатов.

Удельная мощность традиционных электрических машин ограничена тепловыми потерями, при этом допустимая плотность тока в обмотках определяется способом охлаждения и лежит в пределах 5–20 А/мм² [4]. Плотность тока в ВТСП-обмотках при охлаждении жидким азотом может достигать значения 150 А/мм² и более [5].

До недавнего времени СП-обмотки, запитываемые постоянным током, применялись лишь в качестве обмоток возбуждения индукторов электрических машин [6–8]. Якорь таких машин выполнялся традиционной конструкции с медными или алюминиевыми обмотками. Это было связано с высоким уровнем потерь в ВТСП-материалах при работе на переменном токе. Однако современные ВТСП-ленты обладают существенно более низкими потерями при частотах вплоть до 800 Гц и охлаждении жидким азотом [19]. Последнее позволяет приступить к разработке и созданию полностью СП электрических машин с ВТСП-обмотками в статоре и роторе.

Создание полностью СП электрических машин (ПСПЭМ) с СП-обмотками как в индукторе, так и в якоре позволит получить максимальный выигрыш по массогабаритным показателям. Это связано с возможностью увеличения значения магнитной индукции в воздушном зазоре машины, а также с увеличением линейной нагрузки статора [5]. Разработкам СП-машин посвящено значительное количество работ [5, 7–11]. Однако в литературе информация о ПСПЭМ приводится в ограниченном объеме, кроме того, большая часть посвящена машинам на основе низкотемпературных СП. Проектирование полностью ВТСП электрических машин осложнено отсутствием каких-либо универсальных методик расчёта, а также рядом конструктивных особенностей, например, критический ток ВТСП-ленты существенно зависит от внешнего магнитного поля [12]. Также необходимо принимать во внимание механические характеристики ВТСП-ленты. В частности, механические свойства современных ВТСП-лент предполагают не только наличие минимального радиуса изгиба, но и силь-

ные ограничения по кручению ленты. Последнее приводит к тому, что обмотки из ВТСП-лент для электрических машин могут быть выполнены только в виде рейстречковых и кольцевых обмоток [13]. Все это делает необходимым разработку новых методов расчета полностью ВТСП электрических машин.

В статье рассмотрена ПСПЭМ с кольцевой обмоткой якоря и представлена методика определения удельной мощности машины. Приведены результаты конечно-элементного моделирования в трехмерной постановке, включающие в себя оценку влияния внешнего магнитного поля на критические свойства СП-обмотки возбуждения.

Методика расчёта синхронной машины с ВТСП кольцевой обмоткой якоря

Вследствие того, что механические свойства ВТСП-ленты позволяют изготовить из нее только сосредоточенные обмотки, одной из рациональных схем ПСПЭМ является схема с кольцевой обмоткой якоря. В данной схеме обмотки якоря выполняются в виде отдельных сосредоточенных обмоток. При этом плоскость каждой обмотки расположена в радиальном направлении относительно оси вращения ротора. Конструктивная схема такой машины показана на рис. 1,а. Кольцевая обмотка якоря обладает существенно меньшим вылетом лобовых частей по сравнению с барабанной и может быть выполнена в виде отдельных рейстречковых катушек, размещенных на составном кольцевом ферромагнитопроводе [14]. Расчетная схема ПСПЭМ представлена на рис. 1,б. При постановке задачи расчета распределения магнитных полей в активной зоне полностью сверхпроводниковой электрической машины с кольцевой обмоткой якоря в дальнейшем принимаются следующие основные допущения: магнитопровод статора и ротора считается ненасыщенным; машина считается достаточно длинной, $\lambda = L_s / \tau \gg 1$, где $\tau = \pi D_s / p$ — полюсное деление; L_s — активная длина машины; D_s — диаметр расточки статора машины.

Выражение для магнитного потока индуктора ротора при указанных допущениях может быть получено из закона Ома для магнитной цепи [15, 16]:

$$F = \sum \Phi \cdot R_{\mu},$$

где Φ — главный магнитный поток; R_{μ} — магнитное сопротивление участка; $F = IW$ — магнитодвижущая сила (МДС) (I — ток в обмотке возбуждения; W — число витков обмотки возбуждения).

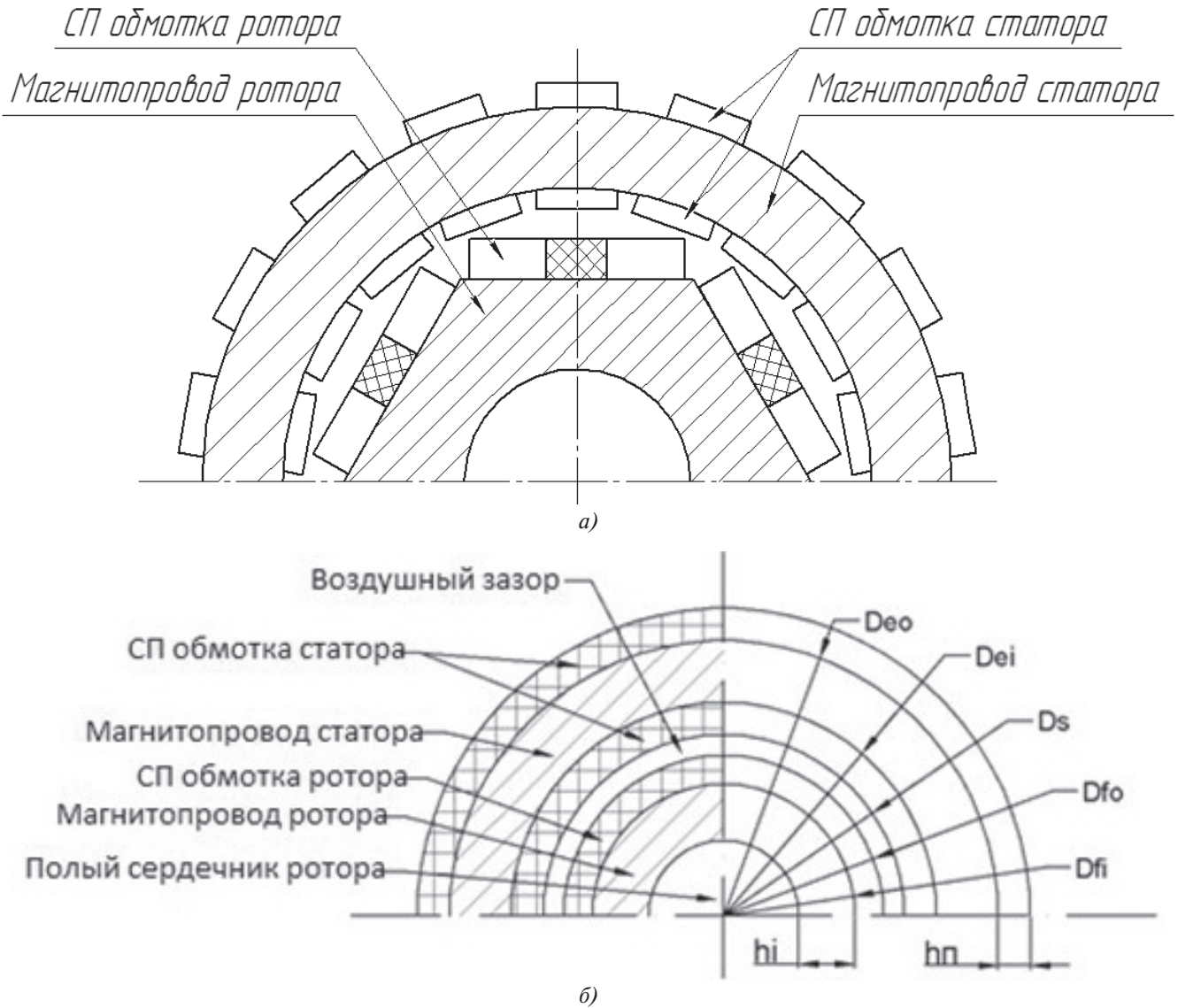


Рис. 1. ПСПЭМ с кольцевой обмоткой якоря: а — конструктивная схема; б — расчетная схема

Для данной конструкции магнитный поток замыкается по следующим участкам: обмотка возбуждения (ОВ), воздушный зазор, обмотка якоря (ОЯ), ярмо статора, ОЯ, воздушный зазор, ОВ, ярмо ротора (рис. 1,а). Учитывая путь замыкания магнитного потока, показанный на рис. 1,а, можно получить выражение для определения МДС машины (в соотношении использованы обозначения размеров основных элементов конструкции машины из рис. 1,б и рис. 2) [17]:

$$F = \Phi_0 (2R_{\mu f} + 2R_{\mu \delta} + 2R_{\mu n} + (1/2)R_{\mu a} + (1/2)R_{\mu i}), \quad (1)$$

где Φ_0 — главный магнитный поток машины;

$R_{\mu f} = (D_{fo} - D_{fi}) / (2\mu b_p L_s)$ — магнитное сопротивление обмотки ротора;

$R_{\mu \delta} = (2\delta p) / (\mu_0 D_s L_s \pi)$ — магнитное сопротивление воздушного зазора;

$R_{\mu n} = (2h_n) / (\mu_0 (D_s + h_n) L_s \pi)$ — магнитное сопротивление обмотки статора;

$R_{\mu a} = (\pi (D_s + 2h_n + h_a)) / (\mu_0 \mu h_a L_s)$ — магнитное сопротивление магнитопровода статора;

$R_{\mu i} = b_p / \mu_0 \mu h_i L_s$ — магнитное сопротивление магнитопровода ротора.

Здесь и далее $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Гн/м — магнитная проницаемость вакуума; μ — относительная магнитная проницаемость стали; δ — величина воздушного зазора; D_{fi} , D_{fo} — внутренний и внешний диаметр ОВ; b_p — ширина полюса ОВ (рис. 2); L_s — активная длина машины; D_s — внутренний

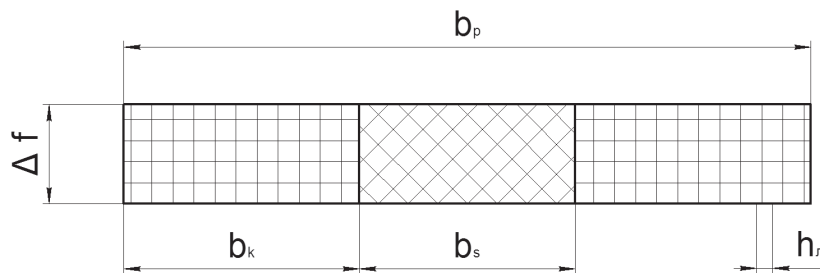


Рис. 2. Схема полюса обмотки ротора

диаметр ОЯ; h_n — высота ОЯ; h_a — высота яра статора; h_i — толщина яра ротора.

Подставив полученные выше выражения для магнитных сопротивлений в соотношение (1), получим выражение для главного магнитного потока машины:

$$\Phi_0 = \frac{I_f b_k \Delta f \mu_0 L_s}{h_l b_l} \left[\frac{2\Delta f}{b_p} + \frac{2p \left(D_s - D_{fo} \cos\left(\frac{\pi p}{4}\right) \right)}{\pi D_s} + \frac{4h_n}{\pi(D_s + h_n)} + \frac{\pi(D_s + 2h_n + h_a)}{2\mu h_a} + \frac{b_p}{2\mu h_i} \right], \quad (2)$$

где I_f — ток в обмотке возбуждения; p — число пар полюсов; h_a — толщина яра якоря; h_n, b_l — толщина и ширина ВСТП-ленты, выбираемые по номинальным данным производителя.

На основе (2) полезная мощность машины определяется как

$$P_2 = mUI \cos \varphi,$$

где m — число фаз обмотки статора; I_a — ток фазы; $\cos \varphi$ — коэффициент мощности; U — напряжение сети.

Без потери точности аналитического расчета напряжение сети U может быть определено в виде

$$U \approx E_0 = 4k_0 f w_a \Phi_0,$$

где E_0 — ЭДС холостого хода; k_0 — обмоточный коэффициент; f — частота сети переменного тока; w_a — число витков фазы обмотки статора [4].

Отсюда с учетом (2) выражение для расчета удельной мощности машины

$$P_{уд} = P_2 / m_{\Sigma},$$

где m_{Σ} — общая масса машины, может быть записано следующим образом:

$$P_{уд} = \frac{8mI_a k_0 f w_a I_f b_k \Delta f \mu_0 L_s \pi \mu h_i}{m_{\Sigma} h_l b_l} \times$$

$$\times \left[4\mu h_i \left(\frac{\pi \Delta f}{b_p} + p \left(1 - D_1 \cos\left(\frac{\pi}{4} p\right) \right) + \frac{2}{D} \right) + \pi^3 (D_3 + 2H + 1) h_i + \pi b_p \right]^{-1}, \quad (3)$$

где $D_1 = D_{fo}/D_s$; $D = (D_s/h_n) + 1$; $D_3 = D_s/h_a$; $H = h_n/h_a$ — конструктивные коэффициенты; m_{Σ} — общая масса машины; h_i — высота яра ротора; h_n — высота яра статора; D_{fo} — внешний диаметр индуктора; D_s — внутренний диаметр якоря; h_a — высота яра якоря; b_k — ширина катушки обмотки возбуждения.

На основании выражения (3) был построен график зависимости удельной мощности ПСПЭМ с кольцевой обмоткой якоря от относительной высоты обмотки возбуждения $Y = \Delta f / D_s$ (рис. 3).

Из рисунка видно, что могут быть выбраны размеры ОВ, позволяющие достичь максимального значения удельной мощности.

На основании приведенной аналитической методики были выбраны геометрические размеры активной зоны машины и определены её параметры, представленные в табл. 1. Как видно из таблицы, машина имеет нестандартное напряжение и частоту, при которых достижима наибольшая удельная мощность. С ростом напряжения необходимо

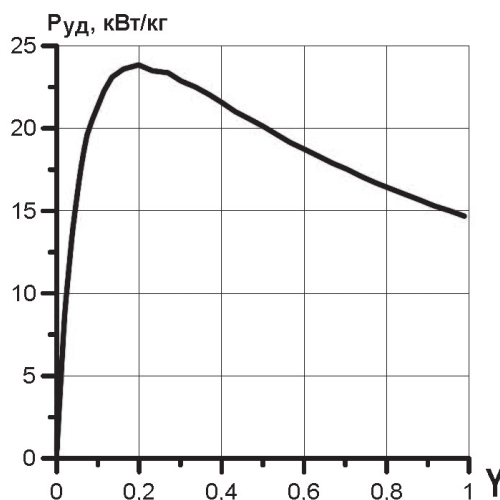


Рис. 3. Зависимость удельной мощности машины от относительной высоты обмотки возбуждения

Таблица 1

Параметры ПСПЭМ с кольцевой обмоткой якоря

| Наименование параметра | Обозначение | Значение |
|---|---------------|----------|
| Мощность, кВт | P | 282 |
| Удельная мощность, кВт/кг | $P_{уд}$ | 15,7 |
| Диаметр расточки статора, мм | D_s | 146 |
| Число пар полюсов | p | 2 |
| Частота вращения, мин ⁻¹ | n | 4500 |
| Внешний диаметр ротора, мм | D_r | 129 |
| Длина активной зоны, мм | L_s | 95 |
| Высота ОВ, мм | Δf | 8 |
| Ток фазы, А | I_a | 2000 |
| Число фаз | m | 3 |
| Конструктивный коэффициент | λ | 0,7 |
| Действующее значение напряжения фазы, В | U | 57 |
| Частота напряжения якоря, Гц | f | 150 |
| Коэффициент мощности | $\cos\varphi$ | 0,93 |

увеличивать поток возбуждения или увеличивать число витков фазы ОЯ. В обоих случаях увеличится масса машины. Кроме того, в качестве исходных данных использовались только мощность и частота вращения ротора без предъявления требований по частоте и величине выходного напряжения. В дальнейшем может быть выполнен переход к стандартным значениям выходных параметров, но удельная мощность при этом окажется несколько ниже.

Для уточнения полученных результатов было выполнено трехмерное моделирование распределе-

ния магнитных полей в активной зоне ПСПЭМ в программной среде Ansys Maxwell. Также трехмерное моделирование позволяет учитывать значение магнитной индукции в области лобовых частей ОВ, что невозможно при двумерном моделировании.

В качестве модели была рассмотрена упрощенная модель ВТСП синхронной машины с кольцевой обмоткой якоря. Ее построение было выполнено с помощью программного комплекса САПР SolidWorks. Результат построения представлен на рис. 4,а. Для определения распределения магнитных полей в активной зоне построенная

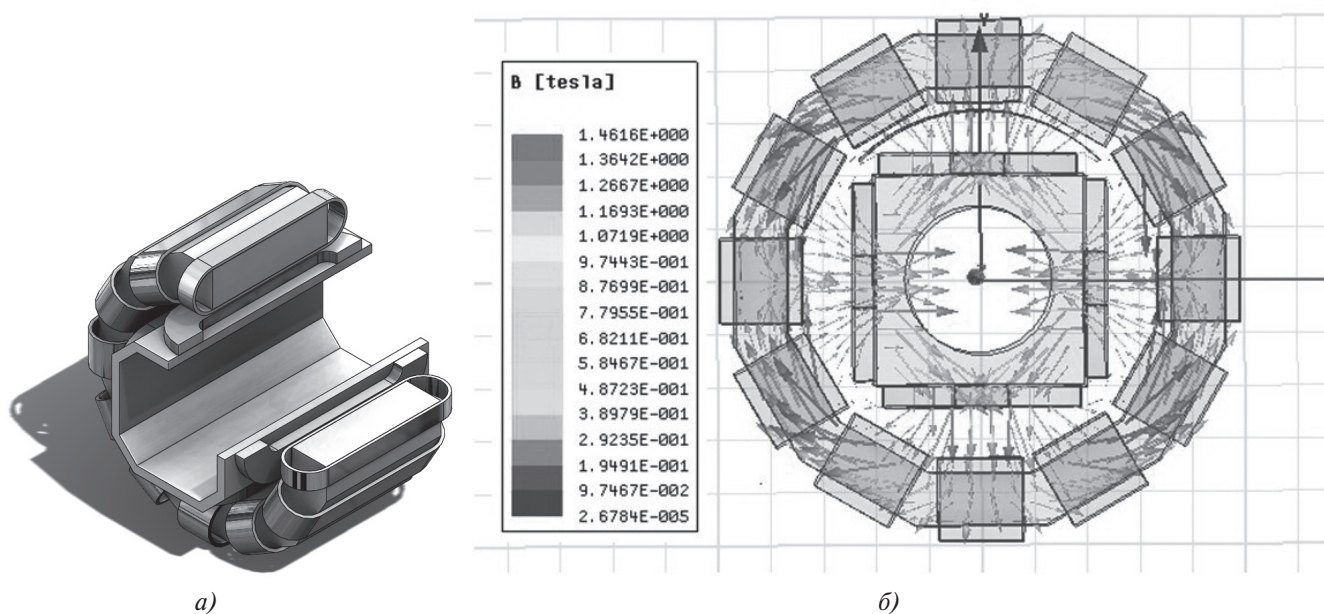


Рис. 4. ВТСП электродвигателя с кольцевой обмоткой якоря: а — трехмерная модель; б — картина распределения магнитных полей в активной зоне

модель была импортирована в модуль «Ansys Maxwell», в котором получен результат моделирования распределения магнитных полей, представленный на рис. 4,б. Моделирование было выполнено для машины с параметрами, приведенными в табл. 1.

Из рис. 4,б видно, что максимальное значение индукции в воздушном зазоре не уступает по величине значению в традиционных электрических машинах и составляет 0,9 Тл. В ярме статора максимальная индукция ниже по сравнению с классическими машинами. В качестве материала катушек ОЯ рассматривалась ВТСП-лента производства фирмы American Superconductor. Данная лента имеет высокие значения критического тока и известную полевую зависимость тока от магнитного поля; диаметр изгиба минимальный — 20 мм [21]. Учитывая это, толщина ярма статора также имеет минимальное значение, равное 20 мм. Для заданной мощности полученные размеры позволяют реализовать наибольшее значение удельной мощности. При этом, в силу невозможности уменьшения, ярмо статора оказывается ненасыщенным, что может быть учтено при разработке конструкции машины. Например, для уменьшения массы машины катушки могут быть изготовлены на немагнитном основании и установлены на ярмо с меньшей высотой. Также с увеличением мощности и размеров машины относительная толщина ярма становится ниже, и величина индукции в нем будет приближаться к индукции насыщения.

Из рис. 4,б также видно, что в ярме ротора значение магнитной индукции составляет 1.46 Тл — это ниже, чем в традиционных машинах. Данное значение может быть увеличено за счет снижения толщины ярма, что также позволит снизить массу электродвигателя.

Значение магнитного потока, полученное при трехмерном моделировании, составило $\Phi_{числ} = 3,9$ мВб, а при аналитическом расчете — $\Phi_{расч} = 4,4$ мВб. Так как степень расхождения полученных результатов составляет не более 15%, то можно сделать вывод о высокой точности проведенных аналитических расчетов. При этом данное значение магнитного потока было получено без учета влияния магнитного поля на критический ток СП. Введение полевой зависимости тока возбуждения от собственного поля ОВ показало, что критический ток составит 64 А, в то время как при аналитическом расчете принято значение тока 74 А.

В связи с этим была поставлена задача поиска рациональной формы катушки ОВ с учетом влияния внешнего магнитного поля, в частности, выбора наиболее рациональной ширины сердечника катушки. Для этого была проведена серия расчетов распределений магнитных полей при различной относительной ширине сердечника $C_p = b_k / b_s$ (b_k — ширина катушки полюса, b_s — ширина сердечника), высоте катушки h (см. рис. 2) и постоянной ширине полюса b_p . Все полученные значения отбирались для коэффициента $k_f = I_{crit} / I_{sp}$, где I_{crit} — критический ток сверхпроводника при данной индукции; I_{sp} — ток сверхпроводника, который задавался при расчете. В табл. 2 представлены результаты расчетов, в которых k_f лежит в пределах от 0,9 до 1. Это говорит о том, что ток в обмотках соответствует критическому току ВТСП-ленты при данной величине магнитной индукции. Также в табл. 2 приведены значения магнитного потока полюса Φ_0 и масса полюса M_p . Проанализировав данные табл. 2, можно выбрать наиболее рациональное значение относительной ширины сердеч-

Таблица 2

Результаты трехмерного моделирования ВТСП двигателя

| C_p | I_{sp}, A | I_{crit}, A | $B_{max}, Tл$ | k_f | $\Phi_0, мВб$ | $M_p, кг$ | $\Phi_0/M_p, мВб/кг$ |
|-------|-------------|---------------|---------------|-------|---------------|-----------|----------------------|
| 0,18 | 95 | 91,5 | 0,81 | 0,96 | 2,6 | 0,224 | 11,7 |
| 0,25 | 90 | 86,8 | 0,89 | 0,96 | 3 | 0,238 | 12,5 |
| 0,33 | 80 | 85,4 | 0,92 | 1,07 | 3 | 0,251 | 11,9 |
| 0,44 | 75 | 83,2 | 0,96 | 1,10 | 3,1 | 0,264 | 11,9 |
| 0,57 | 75 | 77,9 | 1,07 | 1,04 | 3,4 | 0,277 | 12,4 |
| 0,75 | 75 | 73,3 | 1,17 | 0,98 | 3,7 | 0,291 | 12,6 |
| 1,00 | 75 | 69,0 | 1,29 | 0,92 | 3,9 | 0,304 | 12,7 |
| 1,38 | 65 | 70,9 | 1,24 | 1,09 | 3,5 | 0,317 | 10,9 |
| 2,00 | 70 | 63,7 | 1,45 | 0,91 | 3,9 | 0,331 | 11,6 |
| 3,25 | 65 | 63,4 | 1,46 | 0,98 | 3,6 | 0,344 | 10,6 |

ника C_p , при которой реализуется максимальное значение магнитного потока при минимальной массе полюса.

Выводы

Получено аналитическое выражение для главного магнитного потока синхронной электрической машины с ВТСП-обмоткой возбуждения и кольцевой ВТСП-обмоткой якоря.

На основе полученного аналитического расчета выведено соотношение для удельной мощности машины с кольцевой обмоткой якоря. Показано, что удельная мощность может превышать значение 20 кВт/кг.

Библиографический список

1. *Тархов С.А.* Эволюционная морфология транспортных сетей. — Смоленск: Универсум, 2006. — 386 с.
2. *Witte M.* Impacts of Electric Vehicles, 2011. URL: <http://www.ec.europa.eu/>
3. *Щербаков В.* ВТСП провода 2-го поколения: от пилотной технологии к промышленной // Сверхпроводники для электроэнергетики. 2007. Т. 4. Вып. 1. URL: http://perst.issph.kiae.ru/supercond/bullein.php?id=98&menu=bull_subj
4. *Бут Д.А.* Бесконтактные электрические машины. — М.: Высшая школа, 1990. — 416 с.
5. *Глебов И.А., Данилевич Я.Б., Шахтарин В.Н.* Турбогенераторы с использованием сверхпроводимости. — Л.: Наука, 1981. — 231 с.
6. *Jun Z., Feng X., Wei C., Yijun D., Jin C. and Wenbin T.* The Study and Test for 1MW High Temperature Superconducting Motor. // IEEE/CSC & ESAS European Superconductivity News Forum. 2012. No. 22, pp. 6-9.
7. *Dezhin D., Ilyasov R., Kozub S., Kovalev K. and Verzhbitsky L.* Synchronous motor with HTS-2G wires // Journal of Physics: Conference Series. 2014. Vol. 507. No. 3, p. 32011.
8. *Kovalev K., Kovalev L., Poltavets V., Samsonovich S., Ilyasov R., Levin A. and Surin M.* Synchronous Generator with HTS-2G field coils for Windmills with output power 1 MW // Journal of Physics: Conference Series. 2014. Vol. 507. No. 3, p. 32023.
9. *Luongo C.A., Masson P.J., Nam T., Mavris D., Kim H.D., Brown G.V., Waters M. and Hall D.W.* Next Generation More-Electric-Aircraft: A Potential Application for HTS Superconductors // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2009. Vol. 19. No. 3. Part 2, pp. 1055-1068.
10. *Qu R., Liu Y. and Wang J.* Review of Superconducting Generator Topologies for Direct-Drive Wind Turbines // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2013. Vol. 23. No. 3, pp. 1-6.
11. *Wang J., Qu R. and Liu Y.* Comparison Study of Superconducting Generators with Multiphase Armature Windings for Large-scale Direct-drive Wind Turbines // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2013. Vol. 23. No. 3, pp. 1-5.
12. *Fleshler S., DeMoranville K., Gannon J., Li X., Podtburg E., Rupich M.W., Sathyamurthy S., Thieme C.L.H., Tucker D. and Whitman L.* Development Status of AMSC Amperium (r) Wire // Journal of Physics Conference Series. 2014. Vol. 507. No. 2, p. 22005.
13. *Kozub L., Bogdanov S., Dezhin I., Kashtanov D., Kovalev E., Shuvalov K., Smirnov V., Sytnik V., Shcherbakov V., Tkachenko P.* HTS racetrack coils for electrical machines // Proceedings of Cryogenics. 2014, pp. 283-287.
14. *Пенкин В.Т.* Сверхпроводниковый синхронный генератор для автономной энергетической установки летательного аппарата: Дисс. ... канд. техн. наук. — М.: МАИ, 1990. — 233 с.
15. *Постников И.М.* Проектирование электрических машин. — Киев: Государственное изд-во технической литературы УССР, 1960. — 910 с.
16. *Бут Д.А.* Основы электромеханики: Учебное пособие. — М.: Изд-во МАИ, 1996. — 365 с.
17. *Ковалев К.Л., Дежин Д.С., Иванов Н.С.* Оценка перспектив увеличения удельной мощности электрических машин для БЭС и ПЭС // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2015. № 4(35). С. 9-16.
18. СуперОкс. Сверхпроводник в будущее. URL: <http://www.superox.ru/products/973-vtspapproved/>
19. *Li G., Liu H., Wang Y.-S. and Zhang H.* Frequency-Dependence and Anisotropy of AC Losses of Bi2223/Ag and YBCO-Coated Conductors // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2016. Vol. 26. No. 4. URL: <http://ieeexplore.org/document/7399394/>
20. Strategic Research & Innovation Agenda (SRIA). / Materials of Advisory Council for Aviation Research and Innovation in Europe (ACARE) — SRA 1 (2002), SRA 2 (2004) and an Addendum to SRA 2 (2008).
21. American Superconductor (AMSC). URL: <http://www.amsc.com/>
22. *Журавлев С.В., Зечихин Б.С., Кузьмичев Р.В.* Аналитический расчет магнитного поля в активной зоне синхронных машин с постоянными магнитами // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 1. С. 197-209.

SUPERCONDUCTING ELECTRIC MOTOR WITH STATOR RING WINDING

Gabrelyan A.S.^{*}, Ivanov N.S.^{**}, Kondrashov D.A., Korenchuk K.Yu.

Moscow Aviation Institute (National Research University),
MAI, 4, Volokolamskoe shosse, Moscow, A-80, GSP-3, 125993, Russia

* e-mail: artgab21@gmail.com

** e-mail: n.s.ivanov88@gmail.com

Abstract

One of the promising trend of modern transportation systems development is transition to electric propulsion. This is topical for aircraft industry too. However, to solve this problem it is necessary to design electric motors with high power density over 20 kW/kg. To achieve such figures of the specific power is possible only using cryogenic cooling, and modern superconducting materials.

Design of the electric motors with superconducting inductor and armature windings, will allow obtain maximum benefits in terms of weight and size. This relates to the possibility of increasing the magnetic induction value in the motor air gap, as well as with the stator linear load increase.

Design a fully superconducting electric motors is complicated by the absence of any universal computation methods, as well as a number of design features and the critical parameters of high temperature superconducting tapes nonlinearity. All this requires the development of new computation methods for such kind electric motors.

The paper presents a fully superconducting electric motor with a ring armature winding and the method of determining the its specific power and the results of finite element modeling in three-dimensional formulation.

The obtained analytical expression for the main magnetic flux allows derive an equation for the power density of HTS machines with annular armature winding. It is shown, that this power may exceed the value of 20 kW/kg.

Keywords: transportation transition to electric propulsion, high-temperature superconductors (HTS) for electric transport systems, armature ring winding, improved weight and size figures of HTS motors and generators.

References

1. Tarkhov S.A. *Evolyutsionnaya morfologiya transportnykh setei* (Evolutionary morphology of transportation networks), Smolensk, Universum, 2006, 386 p.
2. Witte M. *Impacts of Electric Vehicles*, 2011, available at: <http://www.ec.europa.eu/>
3. Shcherbakov V. *Sverkhprovodniki dlya elektroenergetiki*, 2007, vol. 4, no. 1, available at: http://perst.isssph.kiae.ru/supercond/bullein.php?id=98&menu=bull_subj
4. But D.A. *Beskontaktnye elektricheskie mashiny* (Brushless motors), Moscow, Vysshaya shkola, 1990, 416 p.
5. Glebov I.A., Danilevich Ya.B., Shakhtarin V.N. *Turbogeneratory s ispol'zovaniem sverkhprovodimosti* (Turbine generators using superconductivity), Leningrad, Nauka, 1981, 231 p.
6. Jun Z., Feng X., Wei C., Yijun D., Jin C. and Wenbin T. The Study and Test for 1MW High Temperature Superconducting Motor. *IEEE/CSC & ESAS European Superconductivity News Forum*, 2012, no. 22, pp. 6–9.
7. Dezhin D., Ilyasov R., Kozub S., Kovalev K. and Verzhbitsky L. Synchronous motor with HTS-2G wires. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, vol. 507, no. 3, p. 32011.
8. Kovalev K., Kovalev L., Poltavets V., Samsonovich S., Ilyasov R., Levin A. and Surin M. Synchronous Generator with HTS-2G field coils for Windmills with output power 1 MW. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, vol. 507, no. 3, p. 32023.
9. Luongo C.A., Masson P.J., Nam T., Mavris D., Kim H.D., Brown G.V., Waters M. and Hall D.W. Next Generation More-Electric-Aircraft: A Potential Application for HTS Superconductors. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2009, vol. 19, no. 3, part 2, pp. 1055–1068.
10. Qu R., Liu Y. and Wang J. Review of Superconducting Generator Topologies for Direct-Drive Wind Turbines. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2013, vol. 23, no. 3, pp. 1-6.
11. Wang J., Qu R. and Liu Y. Comparison Study of Superconducting Generators with Multiphase Armature Windings for Large-scale Direct-drive Wind Turbines. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2013, vol. 23, no. 3, pp. 1-5.
12. Fleshler S., DeMoranville K., Gannon J., Li X., Podtburg E., Rupich M.W., Sathyamurthy S., Thieme C.L.H., Tucker D. and Whitman L. Development Status of AMSC Amperium[®] Wire. *Journal of Physics Conference Series*, 2014, vol. 507, no. 2, p. 22005.
13. Kozub L., Bogdanov S., Dezhin I., Kashtanov D., Kovalev E., Shuvalov K., Smirnov V., Sytnik V., Shcherbakov V., Tkachenko P. HTS racetrack coils for electrical machines. *Proceedings of Cryogenics*, 2014, pp. 283–287.
14. Penkin V.T. *Sverkhprovodnikovyyi sinkhronnyi generator dlya avtonomnoi energeticheskoi ustanovki letatel'nogo apparata* (Superconducting synchronous generator for

- aircraft autonomous power plant), Doctor's thesis, Moscow, MAI, 1990, 233 p.
15. Postnikov I.M. *Proektirovanie elektricheskikh mashin* (Electric motors design), Kiev, Gosudarstvennoe izd-vo tekhnicheskoi literatury USSR, 1960, 910 p.
 16. But D.A. *Osnovy elektromekhaniki* (Electromechanics basics), Moscow, MAI, 1996, 365 p.
 17. Kovalev K.L., Dezhin D.S., Ivanov N.S. *Vestnik Rybinskoi gosudarstvennoi aviatsionnoi tekhnologicheskoi akademii im. P.A. Solov'eva*, 2015, no. 4(35), pp. 9–16.
 18. *SuperOks. Sverkhprovodnik v budushchee*, available at: <http://www.superox.ru/products/973-vtspprovod/>
 19. Li G., Liu H., Wang Y.-S. and Zhang H. Frequency-Dependence and Anisotropy of AC Losses of Bi2223/Ag and YBCO-Coated Conductors. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2016, vol. 26, no. 4, available at: <http://ieeexplore.org/document/7399394/>
 20. *Strategic Research & Innovation Agenda (SRIA)*. Materials of Advisory Council for Aviation Research and Innovation in Europe (ACARE) - SRA 1 (2002), SRA 2 (2004) and an Addendum to SRA 2 (2008).
 21. *American Superconductor (AMSC)*, available at: <http://www.amsc.com/>
 22. Zhuravlev S.V., Zechikhin B.S., Kuz'michev R.V. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2016, vol. 23, no. 1, pp. 197-209.