

## Сверхпроводниковая индукторная электрическая машина с комбинированным возбуждением

ИЛЬЯСОВ Р.И., ДЕЖИН Д.С., ДЕЖИНА И.Н.

Для создания полностью электрического самолета [8–10], а также электрического морского [11–12] и наземного транспорта необходимы компактные бесщеточные турбогенераторы и двигатели с высокой удельной мощностью, которые могут быть получены путем увеличения индукции в воздушном зазоре и линейной нагрузки статора. Наиболее перспективный способ достичь этого – использовать катушки возбуждения и обмотки якоря на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) [1–5, 13]. Для традиционных синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением (с ВТСП катушками на роторе) требуются вращающийся криостат и скользящие контакты. Традиционный индукторный двигатель не имеет вращающихся ВТСП катушек возбуждения и криостата, однако из-за отсутствия чередования полярности полюсов индуктора значение ЭДС сравнительно невелико. В статье описана общая конструкция индукторного двигателя с неподвижными ВТСП катушками, обеспечивающая повышенное значение удельной выходной мощности; представлены также результаты трехмерного моделирования магнитных полей.

**Ключевые слова:** индукторная электрическая машина, магнитный поток, комбинированное возбуждение, высокотемпературная сверхпроводимость, обмотка возбуждения, обмотка якоря

Возможность повышения удельной выходной мощности традиционных электрических машин ограничена значением магнитной индукции в воздушном зазоре. Использование сверхпроводниковых (СП) катушек на роторе позволило бы увеличить магнитный поток в воздушном зазоре [1–5], однако для применения СП катушек необходимы вращающийся криостат, шеточно-контактный узел и сложные скользящие уплотнения, что затруднительно реализовать на практике. Индукторные машины с осевым возбуждением от стационарных высокотемпературных сверхпроводниковых (ВТСП) катушек и постоянными магнитами (ПМ) на роторе имеют простую конструкцию криостата и более высокую удельную выходную мощность. В статье рассмотрены три схемы индукторных ВТСП электрических машин и приведены результаты численного моделирования их магнитных полей.

**Принципиальные схемы электрических машин.** Переменный магнитный поток в традиционных индукторных машинах [6] создается чередующимися ферромагнитными полюсами и немагнитными зазорами между ними. Источником магнитного потока являются катушки осевого возбуждения, расположенные на статоре для обеспечения работы бесщеточного двигателя. Поток замыкается по ферромагнитным элементам машины: валу, полюсам индуктора, зубцам якоря, ярму, магнитопроводящему подшипниковому щиту. Значение магнитного потока под ферромагнитным полюсом равно

$\Phi_{ind}$ , а под межполюсным немагнитным зазором – близко к нулю. Согласно закону Фарадея ЭДС рассчитывается как изменение магнитного потока за половину периода  $T$ :

$$E_f = -\frac{\partial\Phi}{\partial t} w_a = -\frac{\Phi_{ind} - (-0)}{T/2} w_a = -2\Phi_{ind} f w_a,$$

где  $f$  – частота ЭДС в обмотке якоря;  $w_a$  – число витков обмотки якоря.

В традиционных синхронных электрических машинах из-за чередования полярностей полюсов индуктора ЭДС имеет в два раза большее значение по сравнению с электрическими индукторными машинами:

$$E_f = -\frac{\partial\Phi}{\partial t} w_a = -\frac{\Phi_{ind} - (-\Phi_{ind})}{T/2} w_a = -4\Phi_{ind} f w_a.$$

Наиболее перспективной гибридной модификацией синхронных и индукторных машин является индукторная машина с комбинированным возбуждением [6]. В ней постоянные магниты закреплены между ферромагнитными полюсами ротора. В этом случае можно обеспечить бесщеточную работу, чередование полярности полюсов и регулирование ЭДС изменением осевого магнитного потока с помощью тока возбуждения. Недостатком гибридной машины является уменьшение потока, создаваемого постоянными магнитами (размагничивание), за счет встречно направленного осевого потока возбу-

ждения. Использование сверхпроводниковых катушек для обмоток с осевым возбуждением значительно размагничивает постоянные магниты, даже в случае их изготовления из редкоземельных материалов с высокой коэрцитивной силой.

Проблема размагничивания в индукторной машине может быть успешно решена путем введения в конструкцию ротора дополнительных ферромагнитных элементов (интерцепторов или магнитных шунтов), которые перехватывают размагничивающую постоянные магниты часть потока и замыкают ее на себя. Небольшое уменьшение потока в воздушном зазоре от постоянных магнитов наблюдается в этом случае только из-за насыщения ферромагнитных полюсов и ярма индуктора.

Сверхпроводниковая индукторная электрическая машина с комбинированным возбуждением состоит из статора с закрытым снаружи ферромагнитным сердечником (из изолированных листов электротехнической стали) и криостата с ВТСП катушками для создания осевого магнитного потока. Трехфазная обмотка якоря расположена в пазах и может быть изготовлена из медных проводов или ВТСП ленты.

Схема магнитных потоков с использованием магнитных интерцепторов (для обеспечения смены полярности полюсов индуктора с использованием в качестве примера четырехполюсного ротора) показана на рис. 1,а (статор не показан). Катушки осевого возбуждения 1 и 5 расположены на статоре. Обмотки якоря статора могут быть изготовлены из лент ВТСП-2 (например, двойные галеты), ВТСП катушки возбуждения охлаждаются жидким азотом, а обмотка якоря может охлаждаться парами азота или водой. В этом случае для работы машины требуется криогенная температура, достичь которую можно путем перекачки жидкого азота или с помощью косвенного охлаждения с использованием криокулера. Неподвижность ВТСП катушек позволяет использовать обычный неподвижный криостат и отказаться от скользящих уплотнений.

Магнитные потоки осевого возбуждения состоят из двух частей: потоков  $\Phi_{ind}$  индуктора 3 и потоков  $\Phi_{int}$ , шунтируемых интерцепторами 2 и 4. Оба компонента осевых потоков замыкаются вдоль ферромагнитного вала 6. Обмотка якоря расположена над ферромагнитным индуктором 3.

Приведенная на рис. 1,а схема имеет удвоенное по сравнению с традиционной индукторной машиной значение наведенной ЭДС аналогично синхронной электрической машине традиционной конструкции.

На рис. 1,а 1, 5 – ВТСП катушки осевого возбуждения, расположенные на статоре; индуктор состоит из ферромагнитных интерцепторов осевого магнитного потока (2, 4), ферромагнитного полюса

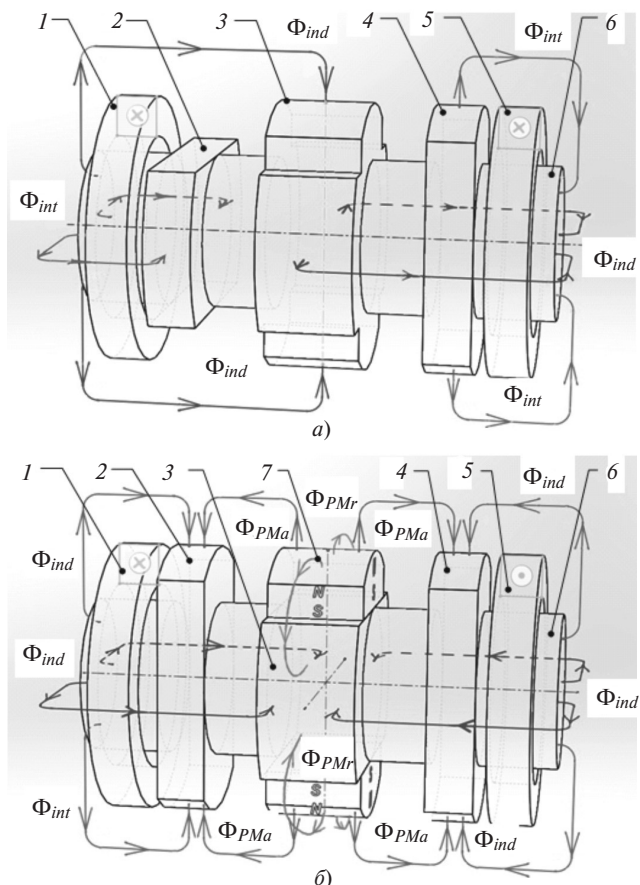


Рис. 1. Схемы магнитных потоков: а – в индукторной электрической машине с магнитными интерцепторами; б – в индукторной электрической машине с комбинированным возбуждением

индуктора (3), ферромагнитного вала (6), высококоэрцитивных постоянных магнитов (7);  $\Phi_{ind}$  – магнитный поток индуктора;  $\Phi_{int}$  – шунтируемый интерцепторами магнитный поток;  $\Phi_{PMr}$  – поток, создаваемый постоянными магнитами, замыкающийся через полюсы индуктора в радиальном направлении;  $\Phi_{PMa}$  – поток, создаваемый постоянными магнитами, замыкающийся через полюсы интерцепторов в осевом направлении.

Схема замыкания магнитных потоков индукторной ВТСП электрической машины с комбинированным возбуждением и магнитными интерцепторами показана на рис. 1,б (статор не показан). В отличие от схемы на рис. 1,а она содержит постоянные магниты, которые заполняют свободное пространство по бокам полюсов индуктора.

Индуктор на роторе состоит из чередующихся ферромагнитных полюсов 3 и полюсов постоянных магнитов 7. Как и в предыдущем варианте, катушки осевого возбуждения 1 и 5 (в этом варианте обязательно должны работать встречно) на статоре создают два типа осевых потоков: поток  $\Phi_{ind}$ , проходящий через индуктор 3, и потоки  $\Phi_{int}$ , шунтируемые интерцепторами 2 и 4.

Постоянные магниты 7 создают два потока. Традиционным способом первый замыкается на

ферромагнитных полюсах индуктора через ярмо статора в радиальной плоскости  $\Phi_{PMr}$ , а второй поток замыкается на полюсах интерцепторов в осевой плоскости  $\Phi_{PMa}$  (не способствует насыщению длинных индуктивных полюсов). Закон Фарадея для этой схемы электрической машины с комбинированным возбуждением записывается в виде:

$$E_f = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} w_a = -\frac{(2\Phi_{PMr} + 2\Phi_{PMa}) - (-2\Phi_{PMr} - 2\Phi_{ind})}{T/2} w_a = -(8\Phi_{PMr} + 4\Phi_{PMa} + 4\Phi_{ind}) f w_a.$$

Следующее конструктивное решение для увеличения удельной мощности – заполнение свободного пространства по бокам интерцепторов радиальными магнитами 7 (рис. 2). Низкое значение относительной магнитной проницаемости ( $\mu \approx 1,05$ ) постоянных магнитов на основе Nd-Fe-B является препятствием на пути внешних осевых потоков возбуждения  $\Phi_{ind}$  и  $\Phi_{int}$  ВТСП катушек. Конструктивно ротор состоит из трех одинаковых пакетов. Таким образом, интерцепторы 2 и 4 превращаются из пассивных элементов в полноценные полюсы магнитоэлектрического генератора. В этом случае можно расположить обмотку статора напротив каждого из трех пакетов ротора. Для того чтобы обеспечить знакопеременное значение ЭДС из-за смены полярности полюсов, обмотка якоря должна быть повернута на  $90^\circ$ .

На рис. 2  $\Phi_{PMi}$  – потоки, создаваемые постоянными магнитами внешних пакетов ротора (2 и 4), замыкаются через полюсы индуктора в осевой плоскости. Общее среднее значение ЭДС обмотки якоря всех трех пакетов может быть рассчитано по закону Фарадея:

$$E_f = -(20\Phi_{PMr} + 8\Phi_{PMa} + 8\Phi_{PMi} + 4\Phi_{ind} + 4\Phi_{int}) f w_a.$$

**Результаты моделирования магнитных полей методом конечных элементов.** Для расчета магнитных потоков в воздушном зазоре и выбора наиболее ра-

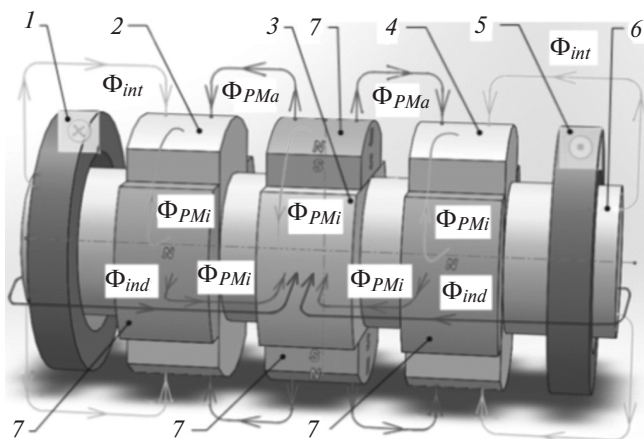


Рис. 2. Схемы магнитных потоков в трехпакетной индукторной электрической машине с комбинированным возбуждением

циональной конструкции электрической машины было проведено моделирование магнитных полей в трехмерной постановке.

Шестиполюсная машина номинальной мощностью 4 МВт и напряжением 1000 В была разработана для стандартной авиационной частоты 400 Гц и частоты вращения ротора  $8000 \text{ мин}^{-1}$ .

На рис. 3,а представлена трехмерная расчетная модель электрической машины (показана 1/4 часть поперечного и продольного половинных сечений). Трехфазная обмотка якоря не показана. Источниками магнитного поля являются высококоэрцитивные постоянные магниты Nd-Fe-B на роторе. Ферромагнитные сердечники изготовлены из электро-технической стали. Катушки возбуждения, создающие осевой поток в статоре, изготовлены из ВТСП-2 и пропускают ток с конструктивной плотностью до  $35 \text{ А/мм}^2$ . Результаты моделирования показаны на рис. 3,б.

Несмотря на наличие высококоэрцитивных ПМ и сверхпроводниковых катушек, все магнитные сердечники не доведены до режима предельного насыщения. Индукция в зубцах не превышает 2 Тл. Ферромагнитные участки цепи, по которым замыкается переменный магнитный поток, имеют индукцию не более 1,9 Тл, что в отличие от традиционных электрических машин с индукцией 1,8–2,2 Тл [1, 14] приводит к уменьшению магнитных потерь, пропорциональных квадрату индукции.

Распределение нормальной составляющей магнитной индукции (см. рис. 4) в воздушных зазорах

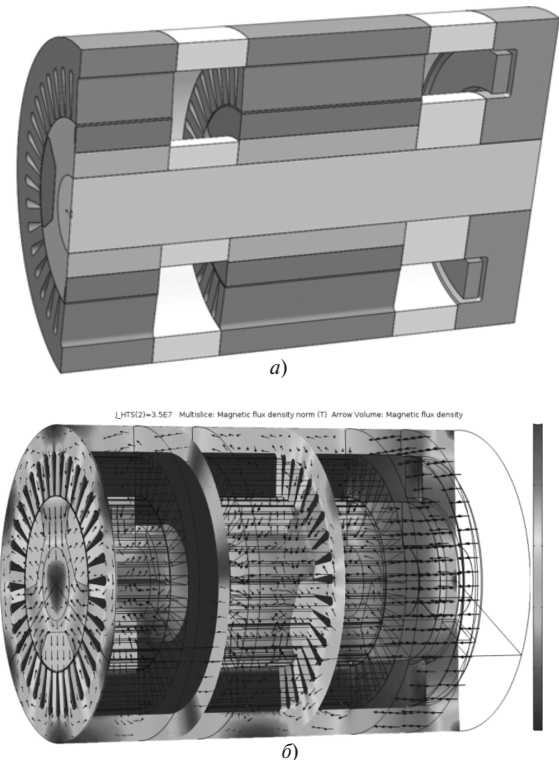


Рис. 3. Трехмерный вид машины: а – расчетная модель; б – распределение магнитных полей



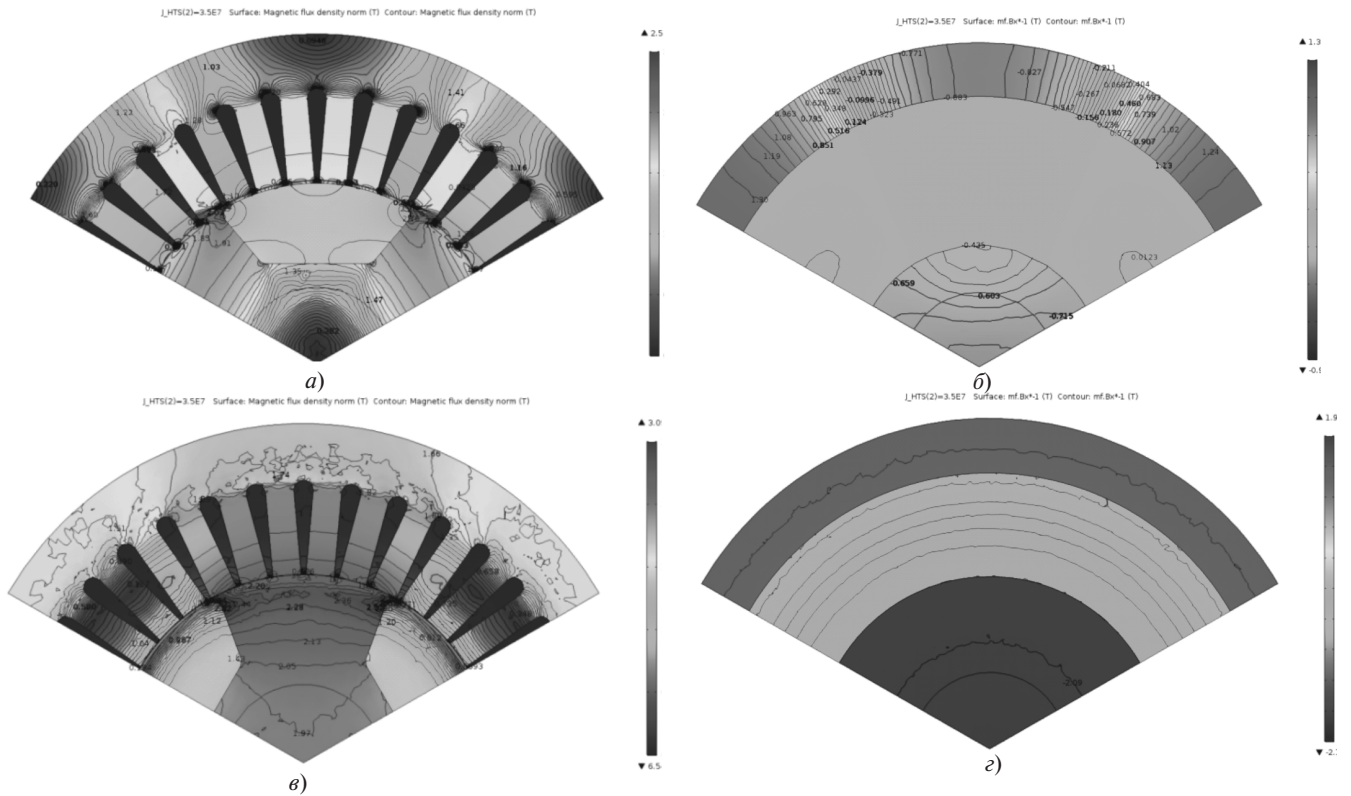


Рис. 4. Сектор поперечного сечения: *a* – центральная часть; *б* – между внутренним и внешним пакетами; *в* – наружный пакет; *г* – между внешним пакетом и катушкой осевого возбуждения

(положительные значения – над полюсами постоянных магнитов, отрицательные – над ферромагнитными (стальными) полюсами) будет зависеть от плотности тока в осевых катушках.

Картина магнитной индукции в продольном сечении (показана правая половина) представлена на рис. 5.

График на рис. 6 показывает, как увеличение тока возбуждения приводит к значительному росту потока через ферромагнитный полюс (нижняя отрицательная полуплоскость), но слегка уменьшает поток над полюсом постоянных магнитов (верхняя положительная полуплоскость) из-за насыщения

сердечника индуктора. Насыщение ферромагнитных полюсов индуктора может быть частично уменьшено [7] с помощью кобальтовых магнитных сплавов с высоким значением индукции насыщения (2,2–2,5 Тл), таких как 49К2Ф, Permendur, Vacodur, Hiperso.

На рис. 7 представлена зависимость магнитной индукции потоков от постоянных магнитов и ферромагнитного полюса, среднее значение индукции на два полюса, а также значение возможных потерь от изменения расчетной плотности тока  $J$  в медных (вместо ВТСП) катушках осевого поля возбуждения. Можно видеть, что при отсутствии тока возбу-

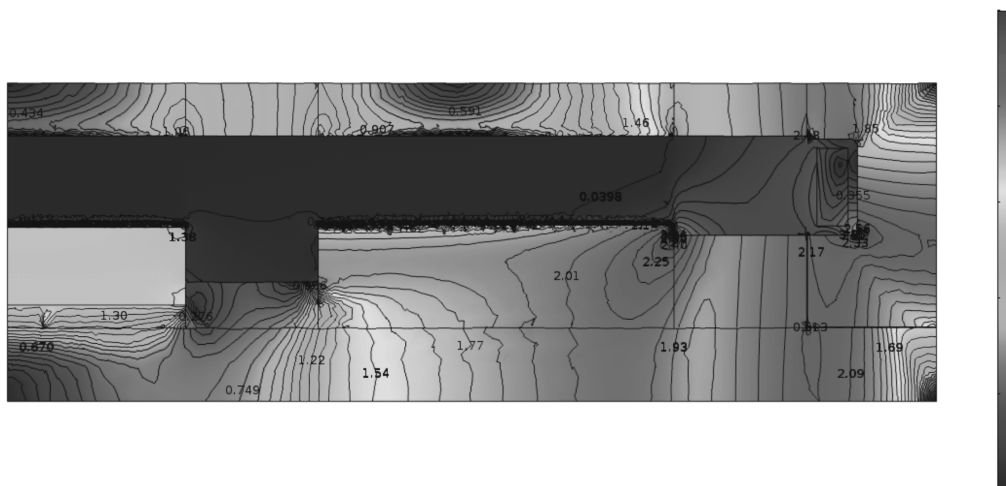


Рис. 5. Магнитная индукция в продольном сечении

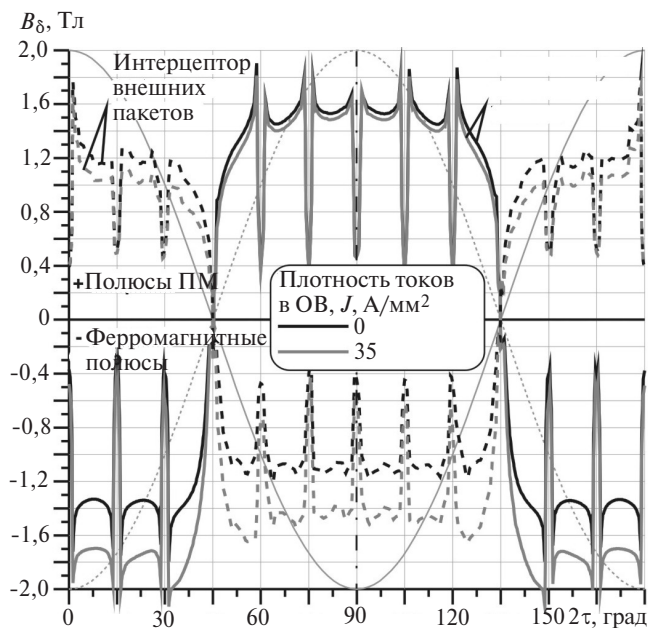


Рис. 6. Индукция магнитного поля в воздушном зазоре внутреннего и внешнего пакетов

ждения  $J=0$  (например, в случае отказа системы криогенного обеспечения, источника питания катушек или из-за потери ими сверхпроводящего состояния) среднее значение индукции будет равно 1,2 Тл, что достаточно для функционирования электрической машины на меньшей мощности.

При включении тока возбуждения среднее значение индукции увеличивается до 1,4 Тл. Более глубокое регулирование поля в воздушном зазоре может быть достигнуто путем изменения направления тока в осевых катушках. В случае, когда используются резистивные (например медные) катушки, при увеличении тока происходит рост электрических потерь, пропорциональный квадрату тока. Помимо снижения общей эффективности машины значительный рост тепловыделения в обмотках осевого возбуждения требует наличия системы принудительного охлаждения. Из графика видно, что медные резистивные катушки имеют 1,1 кВт омических потерь.

**Заключение.** Наиболее перспективной конструкцией полностью электрической ВТСП машины с точки зрения ограничения частоты вращения и момента являются индукторные машины, роторы которых представляют собой стальной (ферромагнитный) цельнометаллический «крест», часто изготовленный вместе с валом. Такой тип ротора хорошо подходит для использования в высокоскоростных турбогенераторах, бурах и гироскопах, мотор-генераторах для накопления кинетической энергии. В то же время их работа сильно зависит от систем электроснабжения, регулирования и охлаждения катушек, что считается недостатком. В случае поломки системы питания обмоток возбуждения машина перестает работать. Комбинированное возбуждение

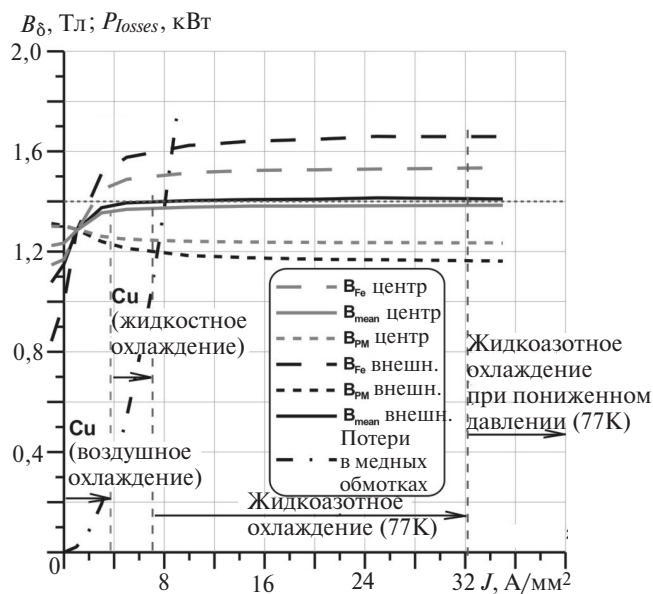


Рис. 7. Индукция магнитных потоков в зависимости от изменения конструктивной плотности тока в обмотке осевого возбуждения

ждение повышает надежность машины, а возможность регулирования потока осевого возбуждения позволяет поддерживать высокие характеристики машины при необходимости изменения частоты вращения.

Удельная выходная мощность (5,25 кВт/кг) сравнительно невысока из-за наличия тяжелого внешнего ферромагнитного сердечника, включая ферромагнитные подшипниковые шиты, но удельная объемная мощность (25,3 МВт/м<sup>3</sup>) значительно возрастет. Например, по сравнению с обычным авиационным синхронным генератором с жидкостным охлаждением, удельная объемная выходная мощность индукторного ВТСП двигателя с комбинированным возбуждением в два раза выше, а по сравнению с бензиновым двигателем внутреннего сгорания – в 6 раз выше.

Предлагаемые компактные и высокоэффективные ВТСП электрические машины могут найти широкое практическое применение в системах морского и наземного транспорта, а также в авиации.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-29-10017.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kovalev K., Kovalev L., Poltavets V., Samsonovich S., Ilyasov R., Levin A., Surin M. Synchronous Generator with HTS-2G field coils for Windmills with output power 1 MW. – IOP Publishing Journal of Physics: Conference Series 507 (2014) 032023. Doi:10.1088/1742-6596/507/3/032023.
2. Kozub S., Bogdanov I., Dezhin D., Kashtanov E., Kovalev K., Shuvalov V., Smirnov V., Sytnik V., Shcherbakov P., Tkachenko L. HTS Racetrack Coils for Electrical Machines. – Refrigeration Science and Technology, vol. 2014, No.1, pp. 283–287.

3. Kovalev K.L., Poltavets V.N., Piyasov R.I., Verzhbitsky L.G., Kozub S.S. 1 MVA HTS-2G Generator for Wind Turbines. – Proceedings of International Conf. on Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering 2017 (IPDME), Russia, 20.10.2017, pp. 1–6.

4. Dezhin D.S., Kovalev K.L., Verzhbitskiy L.G., Kozub S.S., Firsov V.P. Design and Testing of 200 kW Synchronous Motor with 2G HTS Field Coils. – Proceedings of International Conf. on Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering 2017 (IPDME), Russia, No. 87 (2017), pp. 1 – 7.

5. Ковалев Л.К., Ковалев К.Л., Конеев С.М.-А., Пенкин В.Т., Полтавец В.Н., Ильясов Р.И., Дежин Д.С. Электрические машины и устройства на основе массивных высокотемпературных сверхпроводников. М.: Физматлит, 2010. 369 с.

6. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины. М.: Высшая школа, 1990, 416 с.

7. Lokhandwalla M., Haran K.S., Alexander J.P. Scaling studies of high speed high temperature superconducting generator. – Proceedings of 20th International Conf. on Electrical Machines (ICEM 2012), 6349958, pp. 751–756.

8. Masson P.J., Breschi M., Tixador P., Luongo C.A. Design of HTS Axial Flux Motor for Aircraft Propulsion. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2007, vol. 17, No 2, pp. 1533–1536.

9. Иванов Н.С., Кобзева И.Н., Ковалев К.Л., Семенухин В.С. Аналитическая методика расчета полностью сверхпроводниковой электрической машины для летательных аппаратов. Инновационные технологии в энергетике. Кн. 3. Прикладная высокотемпературная сверхпроводимость. М.: Наука, 2016, 142 с.

10. Felder J.L., Kim H.D., Brown G.V. Turboelectric distributed propulsion engine cycle analysis for hybrid-wing-body aircraft. –

47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Orlando, 2009.

11. Sivasubramaniam K., Laskaris E.T., Bray J.W. High power density HTS iron core machines for marine applications. – 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, ES 4276059.

12. Herbst J.D., Gattozzi A.L., Hebner R.E. Megawatt Power Module for Ship Service Supplement. – Program Technical Report, January 2009, Center of Electromechanics, The University of Texas at Austin.

13. Kovalev K.I., Verzhbitsky L.G., Kozub S.S., Penkin V.T., Larionov A.E., Modestov K.A., Ivanov N.S., Tulinova E.E., Dubensky A.A. Brushless superconducting synchronous generator with claw-shaped poles and permanent magnets. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity. DOI: 10.1109/TASC.2016.2524656, April 2016 Article#: 5202405.

[01.04.2019]

*А в т о р ы: Ильясов Роман Ильдусович – кандидат техн. наук, доцент Национального исследовательского университета «Московский авиационный институт» (НИУ «МАИ»), кандидатскую диссертацию защитил в 2007 г.*

*Дежин Дмитрий Сергеевич – кандидат техн. наук, доцент НИУ «МАИ», кандидатскую диссертацию защитил в 2008 г.*

*Дежина Ирина Николаевна – инженер НИО-310 НИУ «МАИ».*

*Elektrichestvo, 2019, No. 7, pp. 46–52*

*DOI:10.24160/0013-5380-2019-7-46-52*

## A Superconducting Inductor Electrical Machine with Combined Excitation

**IL'YASOV Roman I.** (National Research University «Moscow Aviation Institute» – NRU «MAI», Moscow, Russia) – Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

**DEZHIN Dmitriy S.** (NRU «MAI», Moscow, Russia) – Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

**DEZHINA IRINA N.** (NRU «MAI», Moscow, Russia) – Engineer

*For constructing a fully electrical aircraft [8–10], as well as electrical marine [11–12] and overland transport, compact brushless turbine generators and motors with a high specific power capacity are required. Such characteristics can be obtained by increasing the induction in the air gap and the stator linear load. The most promising method for achieving this is to use the excitation and armature winding coils on the basis of high-temperature superconductors (HTSC) [1–5, 13]. To this end, conventional synchronous generators with electromagnetic excitation (with HTSC coils on the rotor) should be equipped with a rotating cryostat and sliding contacts. A conventional inductor motor does not have rotating HTSC excitation coils and a cryostat. However, since there is no alternation of inductor poles polarity, the EMF has a comparatively low value. The article describes the general design of an inductor motor with immobile HTSC coils that makes it possible to obtain an increased specific output power. In addition, the results from 3D modeling of magnetic fields are presented.*

**Key words:** inductor electrical machine, magnetic flux, combined excitation, high-temperature superconductivity, excitation winding, armature winding

### REFERENCES

1. Kovalev K., Kovalev L., Poltavets V., Samsonovich S., Piyasov R., Levin A., Surin M. Synchronous Generator with HTS-2G field coils for Windmills with output power 1 MW. – IOP Publishing Journal of Physics: Conference Series 507 (2014) 032023. Doi:10.1088/1742-6596/507/3/032023.

2. Kozub S., Bogdanov I., Dezhin D., Kashtanov E., Kovalev K., Shuvalov V., Smirnov V., Sytnik V., Shcherbakov P., Tkachenko L. HTS Racetrack Coils for Electrical Machines. – Refrigeration Science and Technology, vol. 2014, No.1, pp. 283–287.

3. Kovalev K.L., Poltavets V.N., Ilyasov R.I., Verzhbitsky L.G., Kozub S.S. 1 MVA HTS-2G Generator for Wind Turbines. –

Development of Mining Machinery and Electrical Engineering 2017 (IPDME), Russia, 20.10.2017, pp. 1–6.

Proceedings of International Conf. on Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering 2017 (IPDME), Russia, 20.10.2017, pp. 1–6.

4. **Dezhin D.S., Kovalev K.L., Verzhbitskiy L.G., Kozub S.S., Firsov V.P.** Design and Testing of 200 kW Synchronous Motor with 2G HTS Field Coils. – Proceedings of International Conf. on Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering 2017 (IPDME), Russia, No. 87 (2017), pp. 1–7.

5. **Kovalev L.K., Kovalev K.L., Koneyev S. M-A., Penkin V.T., Poltavets V.M., Il'yasov R.I., Dezhin D.S.** *Elektricheskiye mashiny i ustroystva na osnove massivnykh vysokotemperaturnykh sverkhprovodnikov* (Electric machines and out-of-date facilities based on massive high-temperature superconductors). Moscow, Fizmatlit, 2010. 369 p.

6. **But D.A.** *Beskontaktnye elektricheskiye mashiny* (A contactless electrical machines). Moscow, Vysshaya shkolam 1990, 416 p.

7. **Lokhandwalla M., Haran K. S., Alexander J.P.** Scaling studies of high speed high temperature superconducting generator. – Proceedings of 20th International Conf. on Electrical Machines (ICEM 2012), 6349958, pp. 751–756.

8. **Masson P.J., Breschi M., Tixador P., Luongo C.A.** Design of HTS Axial Flux Motor for Aircraft Propulsion. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2007, vol. 17, No 2, pp. 1533–1536.

9. **Ivanov N.S., Kobzeva I.N., Kovalev K.L., Semenikhin V.S.** *Analiticheskaya metodika rascheta polnost'yu sverkhprovodnikovoy elektricheskoy mashiny dlya letatel'nykh apparatov. Innovatsionnye tekhnologii v energetike. Kn. 3. Prikladnaya vysokotemperaturnaya sverkhprovodimost'* (Analytical technique for design calculation of a fully superconducting electrical machine for aircrafts. Innovative technologies in power engineering. Applied high-temperature superconductivity). Moscow, Nauka, 2016, 142 p.

10. **Felder J.L., Kim H.D., Brown G.V.** Turboelectric distributed propulsion engine cycle analysis for hybrid-wing-body aircraft. – 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Orlando, 2009.

11. **Sivasubramaniam K., Laskaris E.T., Bray J.W.** High power density HTS iron core machines for marine applications. – 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, ES 4276059.

12. **Herbst J.D., Gattozzi A.L., Hebner R.E.** Megawatt Power Module for Ship Service Supplement. – Program Technical Report, January 2009, Center of Electromechanics, The University of Texas at Austin.

13. **Kovalev K.I., Verzhbitskiy L.G., Kozub S.S., Penkin V.T., Larionov A.E., Modestov K.A., Ivanov N.S., Tulinova E.E., Dubenskiy A.A.** Brushless superconducting synchronous generator with claw-shaped poles and permanent magnets. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity. DOI: 10.1109/TASC.2016.2524656, April 2016 Article#: 5202405.

[01.04.2019]