

# Сверхпроводниковые синхронные электрические машины с когтеобразными полюсами и постоянными магнитами на роторе для систем электроснабжения перспективных летательных аппаратов

БОЯРЧУК К.А., ВЕРЖБИЦКИЙ Л.Г., ДУБЕНСКИЙ А.А., КОВАЛЕВ Л.К.,  
КОВАЛЕВ К.Л., КОНДРАТЮК И.К., МОДЕСТОВ К.А.

*Рассматриваются вопросы создания сверхпроводниковых синхронных генераторов с осевым возбуждением, когтеобразными полюсами и постоянными магнитами на роторе для возможного использования в системах электроснабжения перспективных летательных аппаратов, в том числе на борту «полностью электрифицированного самолета». Приводится описание возможных конструктивных схем таких генераторов, предложена методика их поверочного электромагнитного расчета. Даны результаты экспериментального исследования маломасштабной модели генератора с когтеобразными полюсами. На основании экспериментальных и теоретических исследований ожидается, что применение сверхпроводниковых обмоток возбуждения вместо медных повысит выходную мощность генератора и увеличит жесткость его внешних характеристик. Показано, что применение постоянных магнитов на роторе вместе со сверхпроводниковыми обмотками возбуждения разгружает магнитную цепь машины и улучшает ее характеристики.*

**Ключевые слова:** синхронный генератор с когтеобразными полюсами, сверхпроводниковые обмотки возбуждения, летательный аппарат, электроснабжение

Повышение энергоэффективности системы электроснабжения, предназначенной для применения на борту «полностью электрифицированного самолета» [1], требует совершенствования существующего электроэнергетического оборудования на основе использования высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) с температурой перехода в сверхпроводящее состояние на уровне температуры кипения жидкого азота и применения высококоэрцитивных постоянных магнитов. Так, например, в США разрабатывается концепция «полностью электрифицированного самолета» со сверхпроводниковыми генераторами мощностью 30, 40 МВА [1], в Германии фирмой Siemens создаются ВТСП-двигатели мощностью до 4 МВт [2]. Ожидается [3], что использование сверхпроводниковых материалов может существенно повысить КПД и эффективность электрических машин и значитель-

*Matters concerned with the development of prospective superconducting synchronous generators with axial excitation, clawlike poles, and permanent magnets on the rotor are considered. Such generators can be used in the power supply systems of prospective aircrafts, including those for a «fully electrified aircraft». Possible design arrangements of the generators are described, and a procedure for carrying out their check electromagnetic calculation is suggested. Results from an experimental study of a small-scale generator model with clawlike poles are presented. The results obtained from the performed experimental and theoretical investigations give us grounds to expect that the use of superconducting windings instead of copper ones will make it possible to construct a generator with a higher power output and with more rigid external characteristics. It is shown that the use of permanent magnets on the rotor in combination with superconducting field windings allows certain stress to be relieved from the machine magnetic circuit and better performance of this circuit to be achieved.*

**Key words:** synchronous generator with clawlike poles, superconducting drive winding, aircraft, current supply

но улучшить их массоэнергетические показатели. Это позволит создать более компактные и легкие элементы энергосистем (при той же мощности) или существенно увеличить мощность единичных агрегатов (при тех же размерах и массе) для транспортных систем.

Следует отметить, что несмотря на важность проблемы сверхпроводниковым генераторам для перспективных транспортных средств и вопросам их расчета в технической литературе уделено недостаточно внимания. В данной статье рассматриваются новые конструктивные схемы сверхпроводниковых синхронных генераторов (СПСГ) с осевым возбуждением и когтеобразными полюсами, которые могут быть использованы в системах электроснабжения (СЭС) различных транспортных средств, в том числе в СЭС перспективных летательных аппаратов (ЛА).

**Конструктивные схемы сверхпроводниковых синхронных машин с когтеобразными полюсами.** Среди существующих конструкций синхронных генераторов (СГ) большой мощности, пригодных для использования в СЭС перспективных транспортных средств, можно выделить три основных типа, достоинства и недостатки которых следующие:

Тип машины	Достоинства	Недостатки
СГ традиционной конструкции с электромагнитным возбуждением	простота конструкции; отлаженная за многие годы технология производства	наличие трущихся контактных поверхностей; механические ограничения по частоте вращения вала до 8, 12 тыс. оборотов в минуту
СГ традиционной конструкции с возбуждением от постоянных магнитов	отсутствие обмоток возбуждения; возможность создания высоких значений магнитной индукции в зазоре благодаря новым высокоэнергетическим типам постоянных магнитов	невозможность регулирования потока возбуждения без применения специальных обмоток
СГ с когтеобразным ротором и осевым магнитным потоком	отсутствие обмоток на роторе; однородность структуры материала ротора; высокие значения частоты вращения	увеличенные поля рассеяния; данный недостаток может быть устранен применением диамагнитных ВТСП-вставок и ВТСП-оболочек

Из основного расчетного соотношения [4]

$$D = 3 \sqrt{\frac{S}{kAB_D n l}},$$

связывающего диаметр расточки статора  $D$ , полную расчетную мощность машины  $S$ , линейную токовую нагрузку машины  $A$ , магнитную индукцию в зазоре  $B_D$ , частоту вращения ротора  $n$ , относительную длину активной зоны машины  $l$  и учитывающий структуру обмоток статора коэффициент  $k$ , следует, что для уменьшения габаритов и массы машины при неизменной мощности необходимо увеличивать частоту вращения вала генератора, а также токовую нагрузку, магнитную индукцию в зазоре и, соответственно, МДС системы возбуждения. Последнее указывает на целесообразность применения сверхпроводниковых высокооборотных электрических машин, используемых в качестве бортовых генераторов.

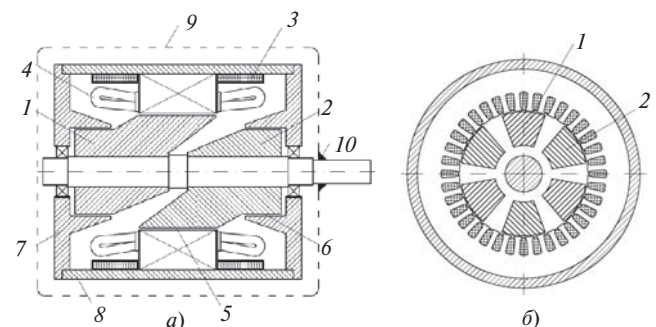
Как известно, синхронные генераторы традиционных конструкций имеют ряд механических ограничений по частоте вращения вала. В связи с действием центробежных сил при вращении вала с большой скоростью и возможностью возникновения упругих резонансных колебаний ротора при

номинальных или близких к ним частотах вращения вала в генераторе целесообразна однородная массивная конструкция ротора генератора, не содержащая обмоток. С учетом вышеизложенного перспективной может оказаться конструкция высокооборотного СГ с когтеобразным ротором и осевым внешнезамкнутым магнитным потоком [5].

На рис. 1 приведен вариант предлагаемой конструктивной схемы СПСГ с когтеобразным ротором и осевым внешнезамкнутым магнитным потоком, основанный на конструктивной схеме классической синхронной машины с когтеобразными полюсами [5]. В конструкцию входят две расположенные на статоре и неподвижные в пространстве кольцевые сверхпроводниковые обмотки возбуждения (СПОВ), выполненные из ВТСП второго поколения, и изготовленные из магнитомягкой стали щиты и корпус. Криостат предназначен для поддержания на требуемом уровне криогенных температур СПОВ и ограничения теплопритоков в зону обмоток возбуждения. Это необходимо для того, чтобы обмотки возбуждения находились в сверхпроводящем состоянии в процессе работы генератора.

С применением СПОВ многократно увеличивается МДС обмоток возбуждения по сравнению с медными обмотками и, следовательно, магнитный поток в зазоре и ЭДС генератора. Охлаждение генератора в целом с помощью азота при пониженных температурах ( $T < 100$  К) позволяет также увеличить токовую нагрузку обмоток якоря и тем самым повысить выходную мощность генератора. Особенностью генератора является своеобразная нешихтованная конструкция ротора-индуктора, не содержащая обмоток и способная выдерживать большие окружные скорости при высоких значениях частоты вращения ( $10 \times 10^3, 12 \times 10^3$  мин<sup>-1</sup> [5] и более).

На рис. 2 показан другой вариант конструкции машины с когтеобразным индуктором и сверхпро-



**Рис. 1.** Конструктивная схема СПСГ с когтеобразными полюсами в продольном (а) и поперечном (б) сечениях: 1 – северная полюсная система; 2 – южная полюсная система; 3 – СПОВ; 4 – обмотка якоря; 5 – основной воздушный зазор; 6 – дополнительный воздушный зазор; 7 – щит; 8 – корпус; 9 – криостат; 10 – уплотнение

водниковой обмоткой возбуждения, отличающийся от предыдущего наличием постоянных магнитов (ПМ) тангенциальной и радиальной намагниченности. Такая конструкция СПСГ совмещает достоинства машин с постоянными магнитами и с когтеобразными полюсами и позволяет проводить глубокое регулирование ЭДС машины. В области когтеобразных полюсов магнитные потоки от ПМ суммируются с потоком СПОВ, что увеличивает максимальную выходную мощность генератора.

Важно отметить, что магнитный поток ПМ, проходящий по внешнему по отношению к ядру статора магнитопроводу машины (части полюсных

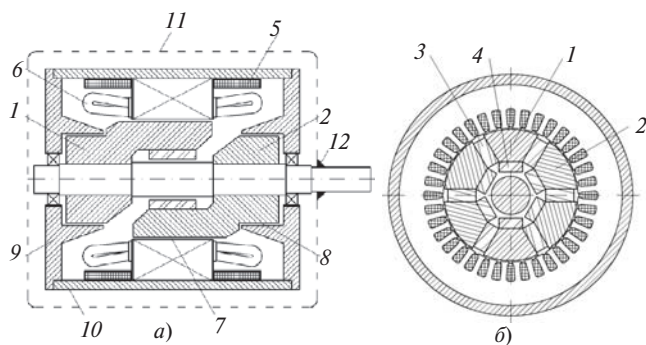


Рис. 2. Конструктивная схема СПСГ с когтеобразными полюсами в продольном (а) и поперечном (б) сечениях: 1 – северная полюсная система; 2 – южная полюсная система; 3 – тангенциально намагниченный ПМ; 4 – радиально намагниченный ПМ; 5 – СПОВ; 6 – обмотка якоря; 7 – основной воздушный зазор; 8 – дополнительный воздушный зазор; 9 – шит; 10 – корпус; 11 – криостат; 12 – уплотнение

систем, щиты и корпус), направлен встречно магнитному потоку СПОВ, что препятствует насыщению внешнего магнитопровода.

**Расчетные схемы и схемы замещения магнитной цепи генераторов.** Для поверочного электромагнитного расчета параметров машин с когтеобразными полюсами, СПОВ и ПМ может быть применен метод теории магнитных цепей [4], основанный на вычислении магнитных сопротивлений (МС) участков магнитной цепи вдоль магнитной силовой линии, форма которой задается, например, из решения задач распределения магнитного поля на участках магнитной цепи. При расчете этим методом для выбранной конструкции генератора строится соответствующая расчетная схема. С целью упрощения вычислений при расчете магнитных сопротивлений проводится кусочно-линейная аппроксимация магнитной силовой линии. Для учета магнитного насыщения полюс разбивается на несколько частей так, чтобы соответствующие им длины частей статора (зубцов и ярма) были равны в осевом направлении (рис. 3). При таком подходе магнитные сопротивления частей ярма, как и частей зубцов, равны на каждом участке разбиения.

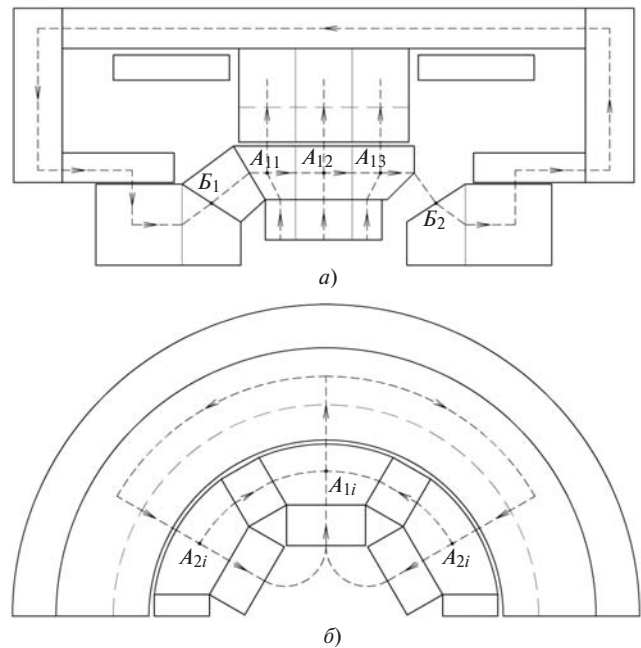


Рис. 3. Расчетные схемы СПСГ с когтеобразными полюсами, СПОВ и ПМ: а – продольное сечение; б – поперечное сечение  $i$ -го участка

Магнитная цепь при учете насыщения в соответствии с кривой намагничивания стали является нелинейной, поэтому расчет проводится методом итераций.

В соответствии с обобщенной расчетной схемой генератора с когтеобразными полюсами, СПОВ и ПМ (рис. 3) при известных геометрии и характеристиках материалов участков были составлены схема замещения магнитной цепи (МЦ) на одну пару полюсов машины для режима холостого хода и блок-схема алгоритма итерационного расчета.

**Калибровка математической модели.** По предложенной методике проведены расчеты маломасштабной модели генератора с когтеобразными полюсами и медной обмоткой возбуждения, экспериментально определены характеристики холостого хода генератора, для оценки точности расчета проведено сравнение расчетных и экспериментальных характеристик, результаты сравнения в относительных единицах представлены на рис. 4.

Из графиков на рис. 4 видно, что в линейной области расчетная и экспериментальная характеристики практически совпадают, небольшое расхождение наблюдается при насыщении магнитопровода и не превышает 7% в точке, соответствующей току возбуждения 1,47 отн. ед. Достаточная точность расчета по предложенной методике позволила определить характеристики экспериментального СПСГ с когтеобразными полюсами, СПОВ и ПМ.

**Расчетные характеристики СПСГ с когтеобразными полюсами, СПОВ и ПМ.** Расчеты проводились в несколько этапов. На первом этапе опреде-

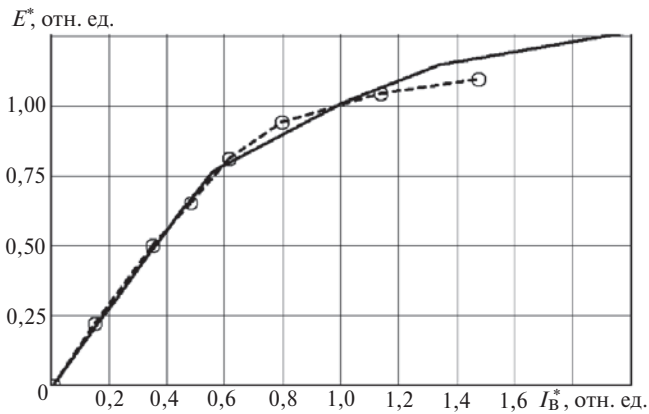


Рис. 4. Расчетная и опытная характеристики холостого хода генератора с медными ОБ (по конструктивной схеме на рис. 1): — — расчет; —о— — опыт

лялась характеристика х.х. генератора при работе только СПОВ в предположении отсутствия ПМ на роторе. На рис. 5,а представлены результаты первого этапа расчета, при этом по оси абсцисс за базисное принято граничное значение МДС СПОВ линейного участка характеристики, а по оси ординат — соответствующая этому значению ЭДС.

На втором этапе (рис. 5,б) определялась характеристика х.х. генератора в зависимости от МДС тангенциально намагниченного постоянного магнита, при этом ток в СПОВ полагался равным нулю. По оси абсцисс за базисное также принято значение МДС ПМ линейного участка характеристики, а по оси ординат — соответствующая этому значению ЭДС.

На третьем этапе (рис. 5,в) МДС постоянного магнита считалась заданной, МДС СПОВ при этом изменялась в широком диапазоне. За базисное значение МДС принята МДС СПОВ, приведенная к МДС ПМ. Как видно из рис. 5,в, добавление МДС СПОВ к МДС ПМ приводит к насыщению магнитопровода генератора, однако его ЭДС при этом возрастает приблизительно в 1,7 раз.

На рис. 6 показаны зависимости ЭДС фазы, генерируемой потоком обмотки возбуждения (рис. 6,а), и зависимости ЭДС фазы, генерируемой потоком постоянных магнитов (рис. 6,б), от коэффициента полюсного перекрытия  $a$ . За базисные величины приняты максимальные значения ЭДС при данных значениях коэффициентов  $a$ . Зависимость ЭДС, генерируемой потоком СПОВ, от коэффициента  $a$  связана с изменением площади сечения полюса и площади его активной поверхности. Зависимость ЭДС, генерируемой потоком ПМ, от коэффициента  $a$  связана с зависимостью МДС радиально намагниченных ПМ от их длины, т.е. от размера межполюсного зазора в тангенциальном направлении. Из приведенных на рис. 6 графиков видно, что максимумы генерируемой ЭДС наблюдаются

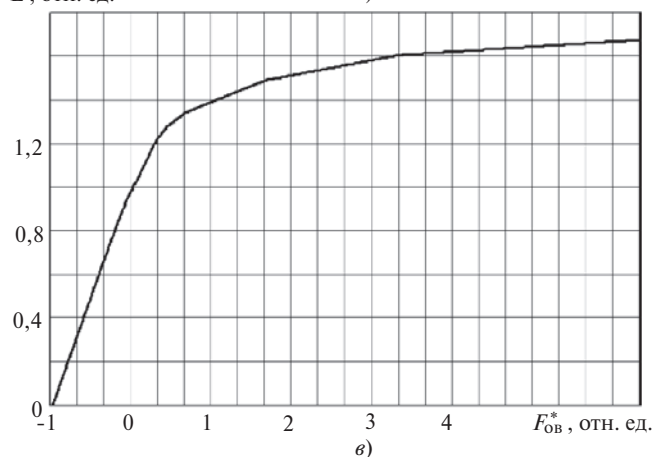
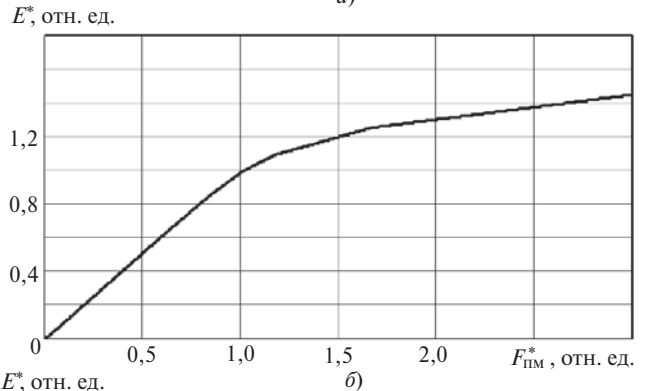
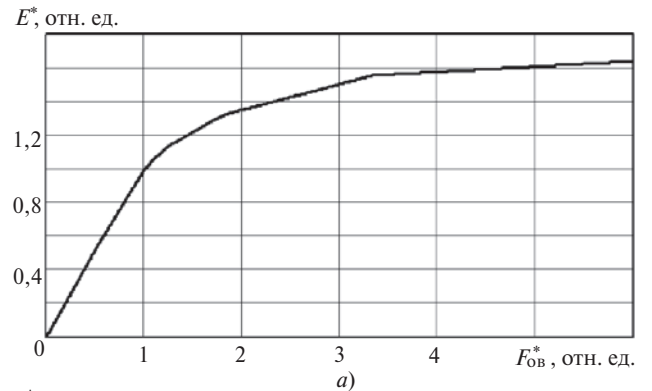


Рис. 5. Результаты расчета характеристики холостого хода модели СПСГ с когтеобразными полюсами, СПОВ и ПМ: а — при работе только СПОВ без учета ПМ; б — при работе ПМ при отсутствии СПОВ; в — при наличии ПМ и СПОВ

при значениях коэффициента полюсного перекрытия  $a = 0,835$  (рис. 6,а) и  $a = 0,765$  (рис. 6,б), что соответствует практике проектирования синхронных машин [4].

**Результаты исследований экспериментальной модели генератора.** Для определения внешних характеристик генератора с когтеобразными полюсами и медными обмотками возбуждения были проведены экспериментальные исследования маломасштабной модели такой машины.

Генератор с медными обмотками помещался в криостат, заполненный жидким азотом. Уменьшение сопротивления медных ОБ при этом позволило повысить ток возбуждения в пределах допустимых

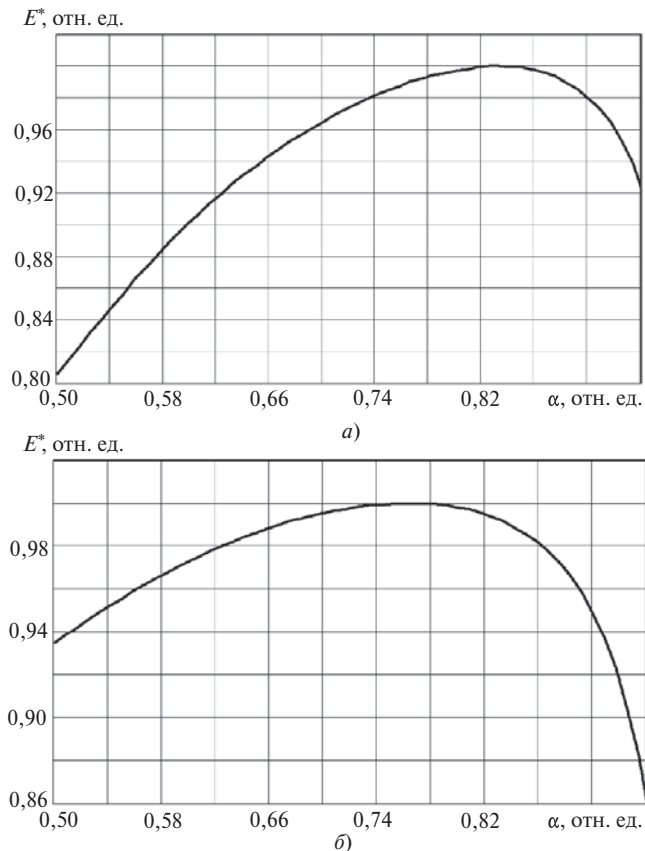


Рис. 6. Зависимости ЭДС от коэффициента полюсного перекрытия: а) – ЭДС от потока ОВ; б) – ЭДС от потока ПМ

тепловых потерь при азотном охлаждении. Таким образом проводилось моделирование параметров генератора с когтеобразными полюсами при существенном увеличении тока возбуждения, ожидаемом при применении сверхпроводниковых обмоток.

Экспериментальные исследования показали, что изменение режима охлаждения (переход от самовентиляции при комнатной температуре к охлаждению жидким азотом) генератора с медными ОВ позволило повысить ток в ОВ в 3,3 раза, ток якоря – в 7,75 раз (рис. 7, кривые 1 и 2), при этом ЭДС холостого хода обмотки якоря возросла в 1,42 раза, что привело к увеличению выходной мощности генератора. При допустимом увеличении тока ОВ магнитная цепь генератора оказывается насыщенной, что способствует увеличению жесткости внешних характеристик и повышению перегрузочной способности генератора.

При установке СПОВ вместо медных ОВ и увеличении МДС ОВ примерно в 4, 5 раз (допустимая плотность тока возрастает в этом случае с 20 до 80, 100 А/мм<sup>2</sup>) ожидается более существенное увеличение выходной мощности и жесткости внешних характеристик (рис. 7, кривая 3).

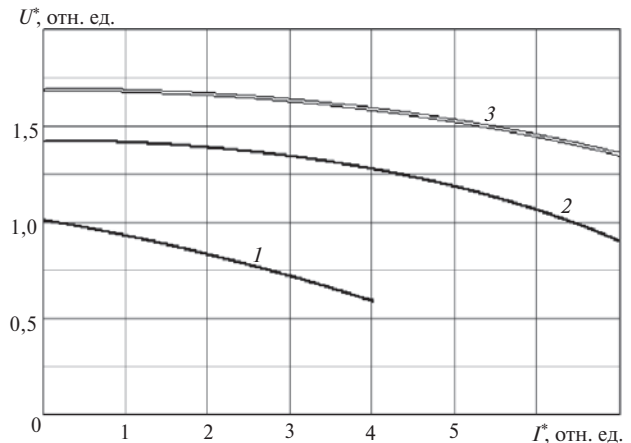


Рис. 7. Внешние характеристики маломасштабной модели генератора: 1 – опытная при токе возбуждения  $I_{\text{ОВ}}^* = 1$  отн. ед.; 2 – опытная при  $I_{\text{ОВ}}^* = 3,3$  отн. ед.; 3 – ожидаемая от применения СПОВ при  $I_{\text{ОВ}}^* = 5$  отн. ед.

**Заключение.** 1. Проведен сравнительный анализ различных схем синхронных генераторов применительно к их использованию в системах электропитания перспективных транспортных систем.

2. Разработана методика оценочного электромагнитного расчета синхронных генераторов с осевым возбуждением, когтеобразными полюсами и постоянными магнитами на роторе.

3. Показано, что синхронные генераторы с обмотками возбуждения из ВТСП второго поколения на статоре и постоянными магнитами на роторе могут оказаться перспективными для применения в системах генерирования транспортных средств нового поколения, в том числе в схемах «полностью электрифицированного самолета».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левин А.В., Алексеев И.И., Харитонов С.А., Ковалев Л.К. Электрический самолет: от идеи до реализации. – М.: Машиностроение, 2010.
2. Ковалев Л.К., Ковалев К.Л., Конев С.М.-А. и др. Электромеханические преобразователи энергии на основе массивных высокотемпературных сверхпроводников. – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2008.
3. Инновационные технологии в энергетике: использование высокотемпературной сверхпроводимости в электроэнергетике/Под ред. Э.П. Волкова, В.В. Костюка. – М.: Наука, 2010.
4. Бут Д.А. Основы электромеханики: Учебное пособие. – М.: Изд-во МАИ, 1996.
5. Апсит В.В. Синхронные машины с когтеобразными полюсами. – Рига: Изд-во АН Латв. ССР, 1959.

[04.07.13]

Авторы: Боярчук Кирилл Александрович окончил физический факультет Ленинградского государственного университета в 1983 г. Докторскую диссертацию защитил в 1998 г. Генеральный директор – главный конструктор ОАО «Научно-исследовательского института электромеханики» (ОАО «НИИ-ЭМ»), г. Истра Московской области.

*Вержбицкий Леонид Григорьевич окончил энергетический факультет Львовского политехнического института по специальности «Электрические машины и аппараты» в 1960 г. Директор – главный конструктор Отделения электрических машин и источников питания ОАО «НИИЭМ».*

*Дубенский Александр Андреевич студент 5-го курса факультета «Системы управления, информатика и электроэнергетика» Московского авиационного института (МАИ). Научный сотрудник кафедры «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы».*

*Ковалев Лев Кузьмич окончил факультет «Энергомашиностроение» Московского высшего технического училища им. Баумана в 1964 г. и механико-математический факультет Московского государственного университета в 1968 г. В 1996 г. защитил докторскую диссертацию по авиационно-космической электроэнергетике в МАИ. Профессор, заведующий кафедрой «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» МАИ.*

*Ковалев Константин Львович окончил в 1993 г. факультет «Экспериментальная и теоретическая физика» Московского инженерно-физического института (МИФИ). В 2005 г. защитил докторскую диссертацию по сверхпроводниковым электрическим машинами. Профессор, ведущий научный сотрудник кафедры «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» МАИ.*

*Кондратюк Игорь Корнеевич окончил электроэнергетический факультет Киевского политехнического института в 1966 г. Заместитель директора Отделения электрических машин и источников питания ОАО «НИИЭМ».*

*Модестов Кирилл Андреевич окончил в 1998 г. факультет «Системы управления, информатика и электроэнергетика» по специальности «Управляющие, пилотажно-навигационные и электроэнергетические комплексы летательных аппаратов». В 2005 г. защитил кандидатскую диссертацию «Гистерезисные электродвигатели на основе объемных высокотемпературных сверхпроводников». Старший научный сотрудник кафедры «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» МАИ.*