

ВЫСОКООБОРОТНЫЙ БЕСПАЗОВЫЙ ГЕНЕРАТОР, ИНТЕГРИРОВАННЫЙ ВО ВСПОМОГАТЕЛЬНУЮ СИЛОВУЮ УСТАНОВКУ: КОНСТРУКЦИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАСШТАБИРУЕМОГО ПРОТОТИПА

Вавилов В.Е.^{*}, Бекузин В.И.^{**}, Айгузина В.В.^{***}

*Уфимский государственный авиационный технический университет,
УГАТУ, ул. К. Маркса, 12, Уфа, Республика Башкортостан, 450008, Россия*

^{}e-mail: s2_88@mail.ru*

*^{**}e-mail: tiobaldo1@rambler.ru*

*^{***}e-mail: vtipy@mail.ru*

Представлена конструкция масштабируемого прототипа высокооборотного беспазового генератора с витым магнитопроводом статора из аморфного железа, интегрированного во вспомогательную силовую установку. Проведены экспериментальные исследования и компьютерное моделирование масштабируемого прототипа в режимах под нагрузкой и на холостом ходу. Показана целесообразность применения беспазовой конструкции генератора с витым магнитопроводом из аморфного железа в безредукторных вспомогательных силовых установках.

Ключевые слова: высокооборотный беспазовый генератор, безредукторная вспомогательная силовая установка, аморфное железо, витой магнитопровод статора.

Введение

Требования по повышению топливной эффективности летательных аппаратов (ЛА), снижению затрат на эксплуатацию и техническое обслуживание ЛА, а также задачи сокращения выбросов газа в окружающую среду делают концепцию полностью электрического самолета (МЕА — more electrical aircraft) одной из основных перспектив развития авиастроения [1–7]. Концепция МЕА предусматривает использование электроэнергии для всех непрямоточных систем. Традиционно эти системы приводятся в движение с помощью комбинации различных вторичных источников энергии: гидравлических, пневматических, механических и электрических, что снижает надежность систем ЛА и увеличивает их энергозатратность. При этом переход только к одному типу энергии — электрической — приведет сразу к нескольким выигрышам для ЛА: снижению взлетной массы, экономии топлива, снижению расходов на эксплуатацию летательного аппарата, а также повышению надежности и упрощению технического обслуживания ЛА [8].

При реализации концепции МЕА, в отсутствие пневматических систем, необходимо обеспечивать

электрозапуск маршевых двигателей ЛА. Запуск маршевых двигателей (МД) традиционно осуществляется за счет пневматической энергосистемы с помощью сжатого воздуха, отбираемого от вспомогательной силовой установки (ВСУ). При этом более половины энергии сжатого воздуха теряется при преобразовании во вращающий момент турбины маршевого двигателя, что значительно увеличивает энергоемкость процесса пуска и снижает эффективность ВСУ. В концепции МЕА пуск маршевых двигателей предлагается обеспечивать двумя способами:

1) прямой запуск МД, благодаря установленному непосредственно на валу высокого давления (НПС) высокотемпературного стартер-генератора (СГ, момент СГ, необходимый для запуска двигателей типа Trent 500, — 250 Н·м), который питается в момент пуска от аккумуляторной батареи (АКБ) [9–12];

2) запуск МД с помощью установленного непосредственно на валу высокого давления высокотемпературного СГ. Электропитание СГ в момент пуска обеспечивается от ВСУ. Данная схема запуска реализована на Boeing 787.

При прямом запуске МД, благодаря питанию СГ НРС от АКБ, мощность АКБ для одного СГ должна составлять 150—200 кВт, что требует значительного увеличения размеров всей системы и снижает эффективность прямого запуска. Вторая схема запуска МД обеспечивается следующим образом: от АКБ запускается СГ ВСУ и раскручивает ВСУ до выхода на необходимую частоту вращения согласно циклограмме. При этом мощность АКБ, необходимая для запуска, составляет 20—25 кВт. После этого СГ ВСУ переходит в генераторный режим и питает СГ НРС. Данная схема электрозапуска является более эффективной, так как ее массогабаритные показатели ниже и она позволяет обеспечить ЛА дополнительными 450—500 кВт электрической мощности, вырабатываемой СГ ВСУ.

Важной задачей при реализации подобной схемы электрозапуска МД является минимизация массогабаритных показателей ВСУ и ее СГ.

Масса ВСУ Boeing 787 (APS 5000) мощностью 500 кВт без топлива — 245 кг. В нее устанавливаются через коробку редукторов два СГ с частотой вращения ротора 12000 об/мин мощностью по 225 кВт каждый и массой 75 кг [13]. То есть полная масса ВСУ с СГ (без учета массы топлива и системы управления генераторами) составляет 375 кг, масса коробки редукторов ВСУ — до 35 кг. Поэтому одним из путей минимизации массы ВСУ является отказ от коробки редукторов и прямая интеграция СГ в ВСУ. При этом, помимо снижения массы самой ВСУ, частота вращения СГ в генераторном режиме при прямой интеграции может достигать

50000—60000 об/мин, что позволяет снизить массу СГ в 2—2,5 раза.

Поэтому крупными авиастроительными корпорациями (АО «Технодинамика», Honeywell, Thales) ведутся работы по созданию безредукторной ВСУ (рис. 1) [14].

Очевидно, что для достижения максимальной эффективности использования безредукторной ВСУ необходимо обеспечить максимальную эффективность ее СГ. В работе [15] компанией Honeywell приводится сравнение электрических генераторов для безредукторных ВСУ по ключевым параметрам, согласно которому генераторы с постоянными магнитами беспазовой конструкции превосходят прочие типы авиационных электрических машин. Также преимущества беспазовых СГ для различных приложений показаны в работах [16—21].

Все это заставляет обратить внимание на данный тип электрических машин для их более детального исследования и оценки перспективности дальнейшего использования в безредукторных ВСУ. В отличие от известных работ [15—21], в данной статье представлены конструкция масштабируемого прототипа высокооборотного беспазового генератора (ВБГ) с магнитопроводом из аморфного железа и результаты его экспериментальных исследований, представлена также компьютерная модель ВБГ, результаты которой верифицируются экспериментально. Дальнейшее масштабирование и оценка эффективности производится уже на компьютерной модели. Подобная постановка задачи ранее не рассматривалась, она является новой и имеет значительную практическую ценность для авиастроительной отрасли.

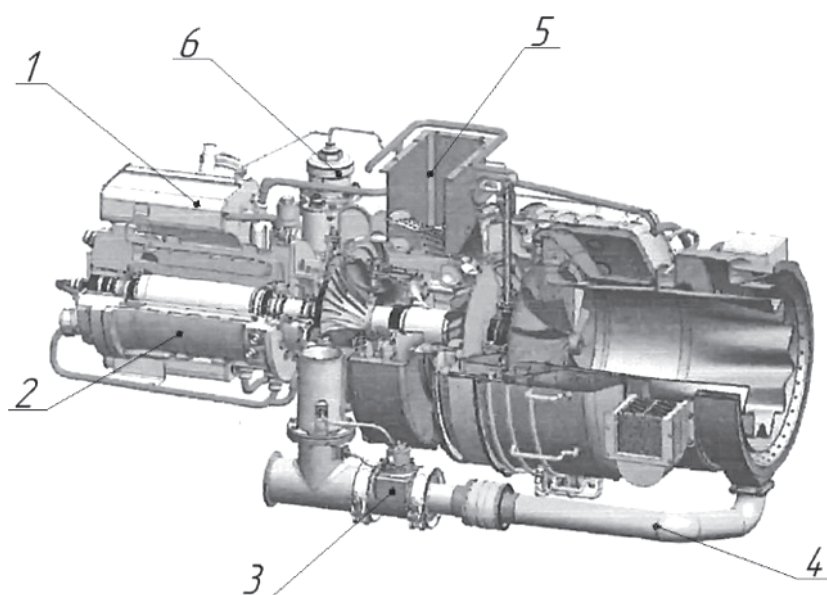


Рис. 1. Безредукторная ВСУ: 1 — маслобак; 2 — стартер-генератор; 3 — клапан перепуска; 4 — труба перепуска; 5 — входное устройство; 6 — масляный насос

То есть основной идеей данной статьи являются экспериментальные исследования ВБГ с повышенным КПД (повышенный КПД достигается благодаря применению аморфного железа) и оценка его эффективности для применения в безредукторных ВСУ.

1. Описание экспериментального масштабируемого прототипа высокоскоростного беспазового генератора

Для реализации поставленной задачи был разработан масштабируемый прототип ВБГ на постоянных магнитах марки Sm_2Co_{17} с витым магнитопроводом из аморфной стали марки 5 БДСР. На рис. 2 представлен магнитопровод статора из аморфного железа. Для упрощения технологии изготовления масштабируемого прототипа использовалась кольцевая обмотка. На рис. 3 представлен ротор с постоянными магнитами масштабируемого прототипа. Так как частота вращения ротора не превышает 3000 об/мин, то бандаж был выполнен из фторопластовой втулки.

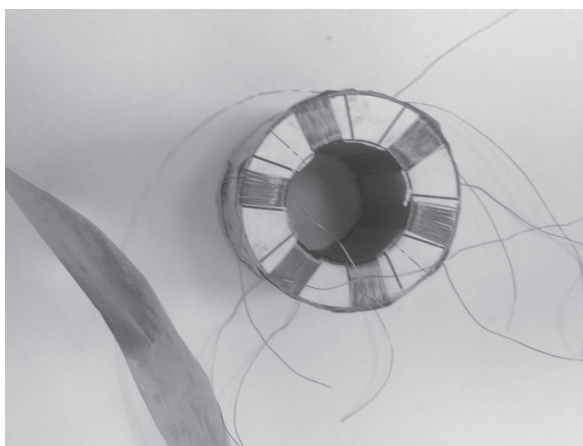


Рис. 2. Магнитопровод статора из аморфного железа 5БДСР

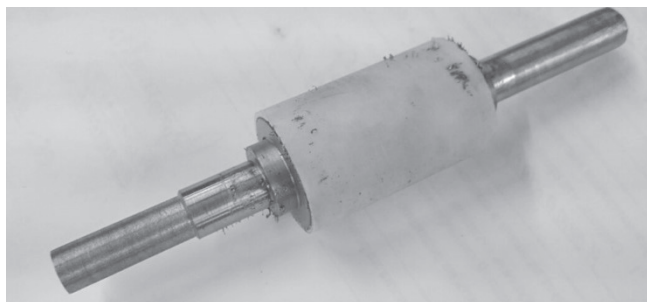


Рис. 3. Ротор с постоянными магнитами

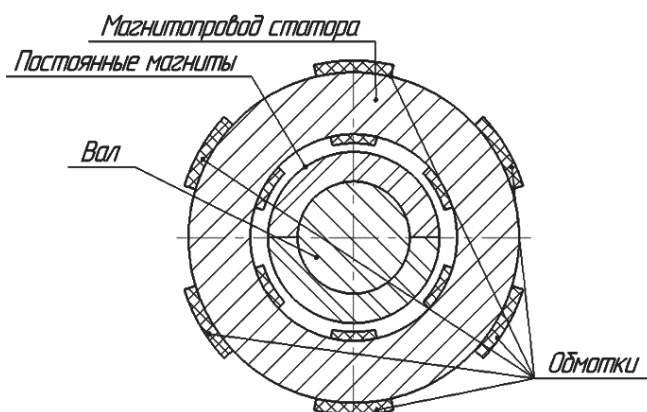


Рис. 4. Общая конструктивная схема масштабируемого прототипа

На рис. 4 представлена общая конструктивная схема масштабируемого прототипа, в табл. 1 приведены его основные параметры.

2. Ход и результаты экспериментальных исследований масштабируемого прототипа высокоскоростного беспазового генератора

Экспериментальные исследования проводились в нормальных условиях: температура воздуха в помещении $(25 \pm 5)^\circ C$ (входной, промежуточный и выходной контроль). Используемое оборудование

Таблица 1

Основные параметры масштабируемого прототипа

№	Наименование	Значение
1	Диаметр вала	19 мм
2	Внутренний диаметр/внешний диаметр/материал постоянных магнитов	19 мм/ 29 мм/ Sm_2Co_{17}
3	Внутренний диаметр/внешний диаметр/ материал магнитопровода статора	35 мм/ 56 мм/ аморфная сталь марки 5БДСР толщиной 25 мкм
4	Активная длина магнитопровода статора	51 мм
5	Активная длина постоянных магнитов	40 мм
6	Количество фаз	3
7	Количество катушек на фазу	2
8	Количество полюсов	2
9	Число витков катушки	52

(осциллографы, вольтметры, амперметры) имеет действующие сертификаты о поверке.

В ходе проведения экспериментальных исследований осуществлялись следующие операции:

- с помощью бесколлекторного двигателя посредством жесткой муфты ротор масштабируемого прототипа ВБГ был раскручен до частоты вращения 3000 об/мин, были произведены измерения выходного напряжения (напряжения холостого хода и под нагрузкой) с одной фазы БМГ и тока в обмотке;

- аналогичные измерения были произведены для трех фаз масштабируемого прототипа ВБГ, соединение фаз — звезда.

Экспериментальная установка показана на рис. 5.

Результаты прямых измерений одной фазы — фазы А — для режимов холостого хода и под нагрузкой представлены в табл. 2.

Результаты измерений для трех фаз представлены в табл. 3 и на рис. 6.

По результатам экспериментальных исследований была построена внешняя характеристика масштабируемого прототипа ВБГ (рис. 7).

Анализируя полученные данные, можно сделать следующие выводы:

- выходные осциллограммы напряжения под нагрузкой и без нагрузки имеют только одну основную гармонику, что свидетельствует о минимальных потерях в роторе и минимальных пульсациях напряжения;

- несмотря на увеличенный воздушный зазор, беспазовый генератор обладает высокими удельными энергетическими характеристиками. Это достигается повышенной линейной токовой нагрузкой. При этом схема охлаждения такой машины, благодаря малым потерям в роторе и, соответственно, отсутствию необходимости его охлаждения, более простая;

- ввиду резкого изменения напряжения от нагрузки необходимо использовать систему стабилизации напряжения, масса которой может достигать 1/3 массы генератора.

Таблица 2

Результаты измерений фазы А

Режим	I , А	R^* , Ом	U , В
Холостой ход	-	-	7,35
Под нагрузкой	0,5	11,7	5,84
Под нагрузкой	0,7	7,61	5,28
Под нагрузкой	1	4,31	4,14
Под нагрузкой	1,31	2,88	3,55

Таблица 3

Результаты измерений для трех фаз

Режим	I , А (в фазе)	R , Ом (в фазе)	U , В (в фазе)	Осциллограмма
Холостой ход	-	-	7,3	Рис. 6,а
Под нагрузкой	1,47	2,2	3,25	Рис. 6,б

* Внешняя нагрузка, сопротивление фазы 2,73 Ом, индуктивность фазы 873 мкГн.

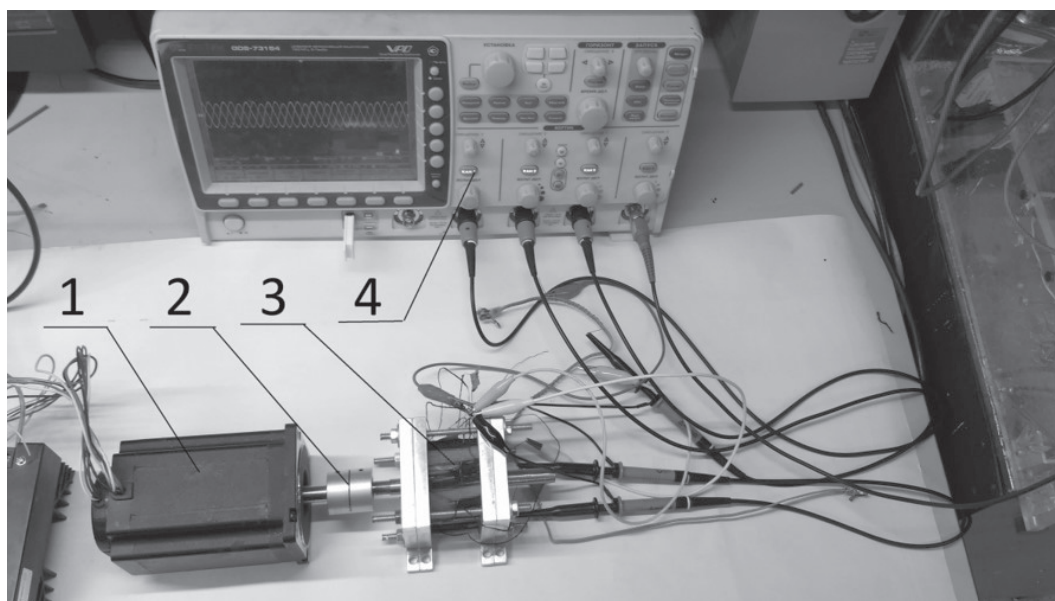
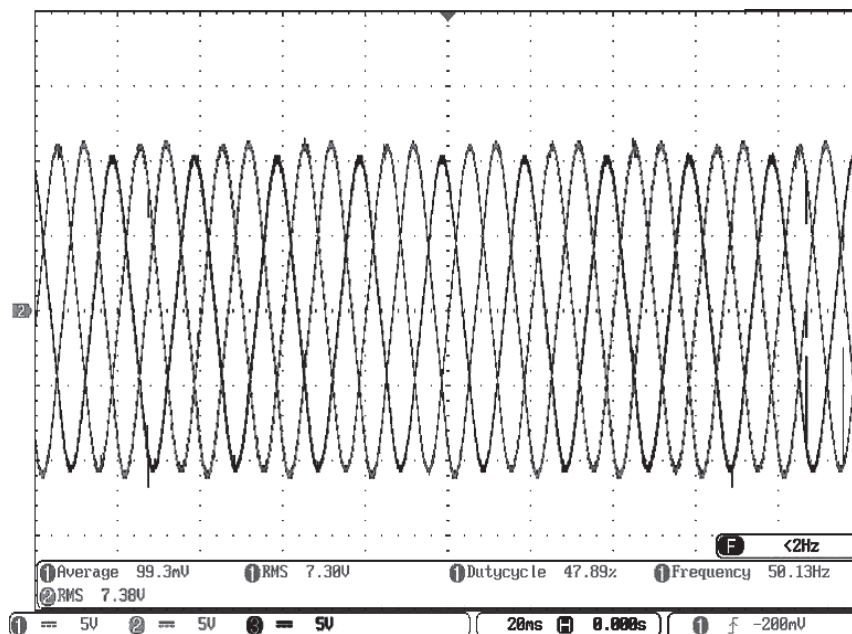
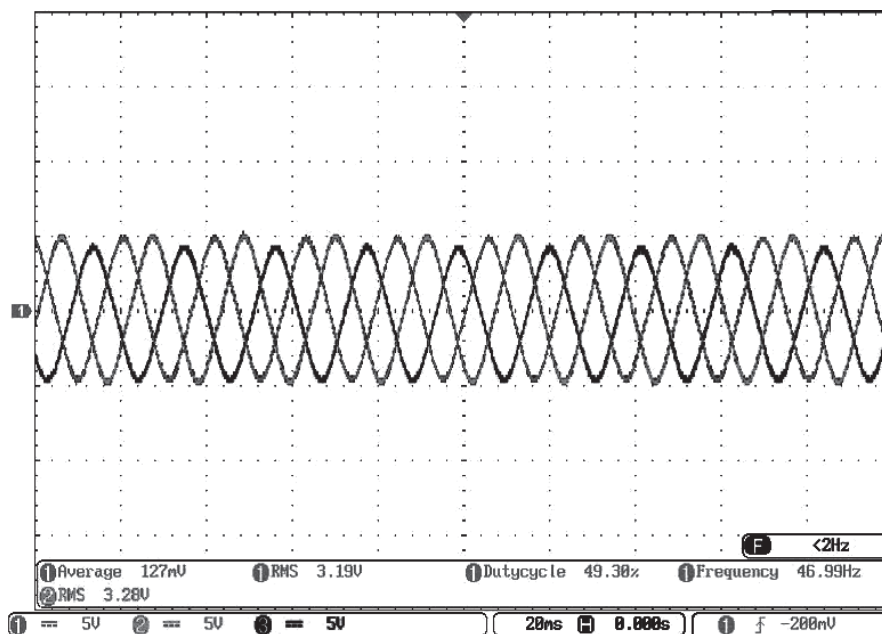


Рис. 5. Экспериментальная установка: 1 — бесколлекторный приводной двигатель; 2 — жесткая муфта; 3 — масштабируемый прототип; 4 — осциллограф



a)



b)

Рис. 6. Осциллограмма трех фаз БМГ: а — холостой ход; б — под нагрузкой

3. Экспериментальные исследования потерь в магнитопроводе статора из аморфного железа на высоких частотах перемагничивания

Для оценки эффективности использования аморфного железа в магнитопроводах статора высокооборотных генераторов были проведены исследования потерь в магнитопроводе статора при высоких частотах перемагничивания. Для проведения экспериментальных исследований ФГБОУ ВО «УГАТУ» совместно с НПО «Интротест» (г. Екатеринбург) была осуществлена глубокая модернизация серийной магнитоизмерительной установки

МК-4Э, что позволило измерять на ней удельные потери в магнитомягких образцах кольцевой формы на частотах перемагничивания до 2000 Гц (на серийной установке возможны измерения только до 400 Гц). Установка прошла сертификацию и поверку (свидетельство о поверке № 166095-0061-26).

Экспериментальные исследования выполнялись при синусоидальном перемагничивании образцов в широком диапазоне индукций (в том числе и при индукциях насыщения) при частотах 400 Гц, 1000 Гц, 2000 Гц и комнатной температуре (25 °С, относительная влажность воздуха 25%). Для экспе-

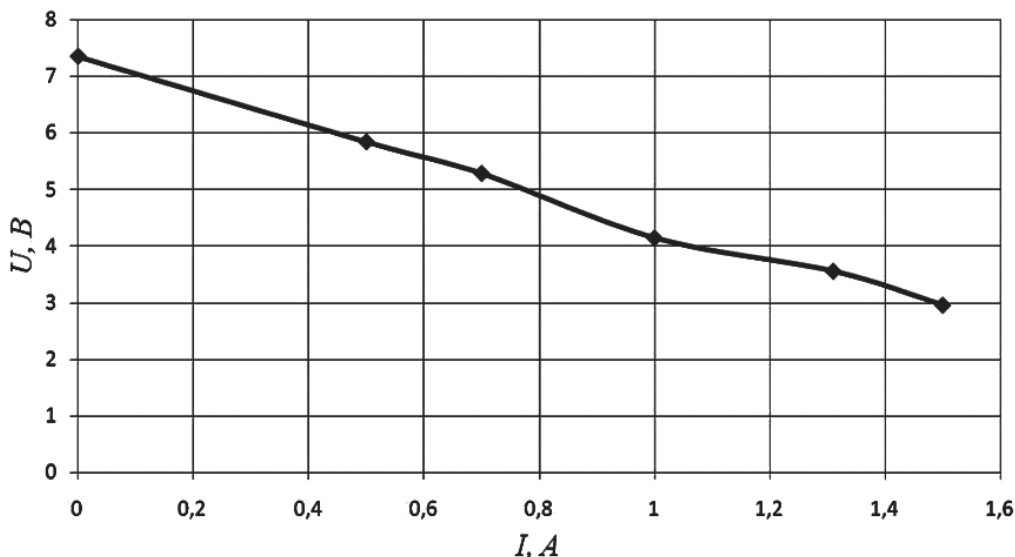


Рис. 7. Внешняя характеристика масштабируемого прототипа ВБГ

риментальных исследований на высоких частотах был выбран витой магнитопровод из ленты аморфного железа 5БДСР, тип Е (толщина 25 мкм, индукция насыщения 1,3 Тл).

Перед экспериментальными исследованиями образцы нормировались — были произведены замеры удельных потерь при частоте 400 Гц и индукциях, указанных в ГОСТе или ТУ на соответствующий образец. Расхождение измеренных результатов и указанных в ГОСТе составляло не более 1,5 %.

Результаты экспериментальных исследований потерь в магнитопроводе статора из аморфного железа 5БДСР, тип Е, при высоких частотах перемagnичивания представлены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты экспериментальных исследований потерь в магнитопроводе статора из аморфного железа 5БДСР, тип Е

Частота, Гц	Магнитная индукция, Тл	Удельные потери, Вт/кг
400	1	6
1000	1	12
2000	1	17

Таким образом, в результате экспериментальных исследований установлено, что потери в магнитопроводе статора из аморфного железа при частотах до 2000 Гц составляют не более 10—12 Вт/кг, т.е. они ниже потерь в магнитопроводе статора обычных электрических машин в 10—15 раз.

4. Разработка компьютерной модели масштабируемого прототипа высокоскоростного беспазового генератора

С помощью программного комплекса Ansoft Maxwell была разработана компьютерная модель масштабируемого прототипа ВБГ. На рис. 8 представлена картина распределения магнитного поля масштабируемого прототипа, полученная с помощью компьютерного моделирования с учетом нагрузки и внешней сети.

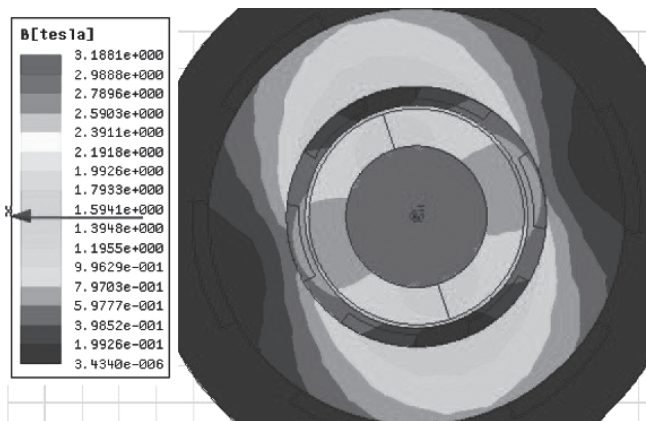


Рис. 8. Картина распределения магнитного поля масштабируемого прототипа

На рис. 9 представлены функции зависимости ЭДС от времени при холостом ходе в одной катушке фазы А.

Программный комплекс Ansoft Maxwell показывает напряжение на каждой из двух катушек фазы. Поскольку количество витков на катушках одинаковое, то графики ЭДС катушек накладываются друг на друга (рис. 9). Поэтому, чтобы получить

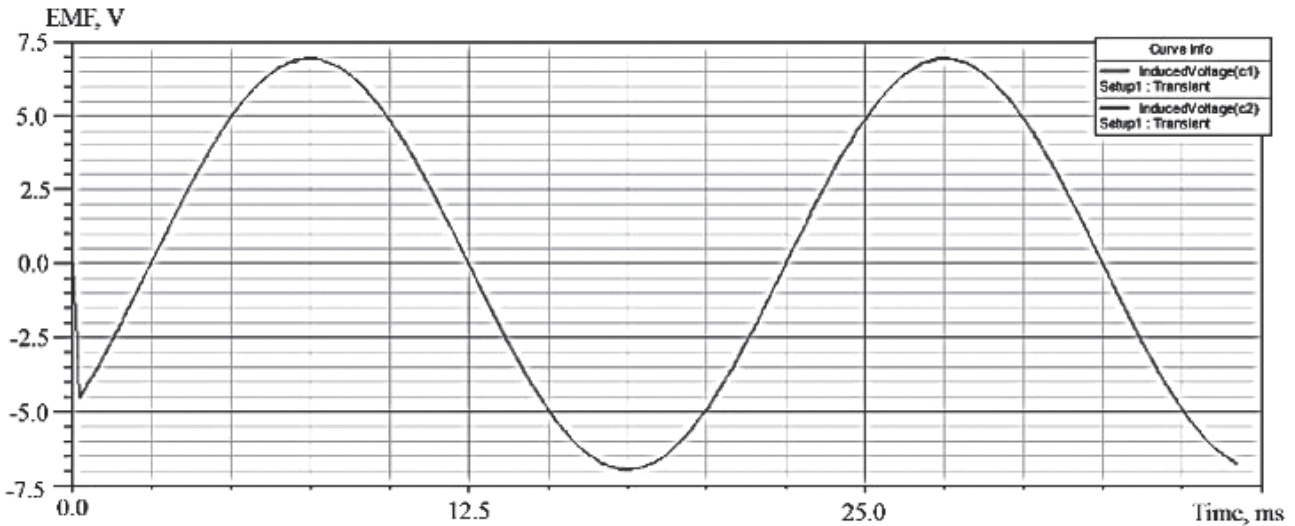


Рис. 9. Функция зависимости ЭДС от времени при холостом ходе в одной катушке фазы А

реальное значение ЭДС, необходимо умножить на два значения ЭДС из рис. 9. В результате действующие значение напряжения холостого хода

$$U_d = \frac{2E_m}{\sqrt{2}k_e} = \frac{2 \cdot 6,5}{\sqrt{2} \cdot 1,2} = 7,68 \text{ В}, \quad (1)$$

где E_m — амплитудное значение ЭДС фазы А; k_e — коэффициент падения напряжения.

Расхождение расчетного значения ЭДС с действующим значением, полученным экспериментально, составляет 5 %.

Для дальнейшего нормирования экспериментального образца с компьютерной моделью выставим нагрузку в 11,7 Ом. График функции зависимости тока в фазе А от времени представлен на рис. 10.

Действующее значение тока в программной модели

$$I_d = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{0,688}{\sqrt{2}} = 0,49 \text{ А}, \quad (2)$$

где I_m — амплитудное значение тока.

Расхождение составляет 2,5 %.

Функция зависимости ЭДС от времени при нагрузке в 0,5 А представлена на рис. 11.

Действующее значение напряжения фазы А:

$$U_d = \frac{2E_m}{\sqrt{2}k_e} = \frac{2 \cdot 4,9}{\sqrt{2} \cdot 1,2} = 5,79 \text{ В}. \quad (3)$$

Расхождение действующего напряжения фазы А при нагрузке 0,5 А составляет 1 %.

Таким образом, расхождение экспериментальных данных с данными компьютерного моделиро-

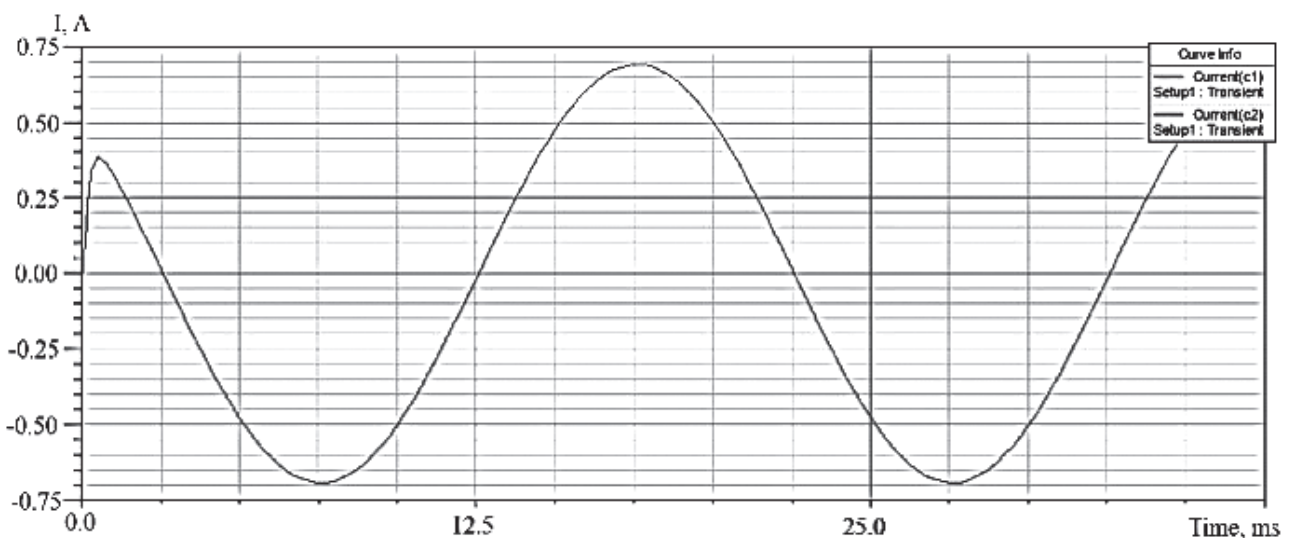


Рис. 10. Функция зависимости тока в фазе А от времени

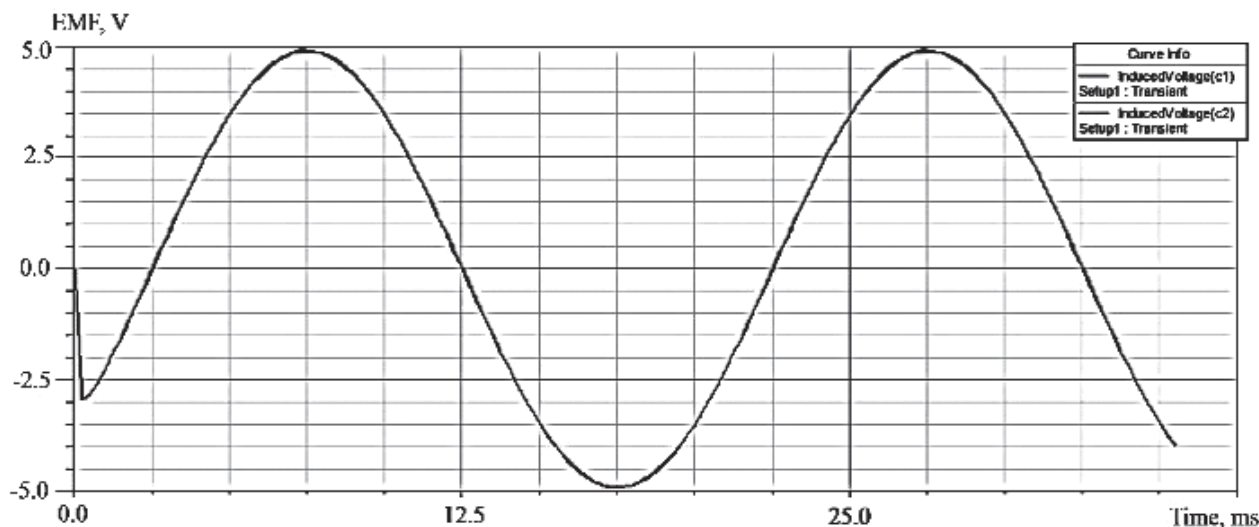


Рис. 11. Функция зависимости ЭДС от времени при нагрузке 0,5 А

вания составляет не более 5 %, т. е. масштабирование компьютерной модели не приведет к значительной погрешности.

5. Предварительные расчеты и оценка показателей высокоскоростного беспазового генератора мощностью 100 кВт и частотой вращения ротора 60000 об/мин для безредукторной ВСУ

Используя нормированную компьютерную модель, рассчитаем ВБГ мощностью 100 кВт (табл. 5).

Ранее коллективом был разработан высокооборотный генератор с зубцовым магнитопроводом

(ЗМГ) мощностью 100 кВт, предназначенный также для применения в безредукторных ВСУ (рис. 12) [22, 23]. Поэтому для оценки эффективности применения ВБГ в безредукторных ВСУ проведено сравнение этих двух типов генераторов мощностью 100 кВт с частотой вращения ротора 60000 об/мин (табл. 5 и 6). В табл. 5 приведены их номинальные данные, в табл. 6 — значения массы и потерь.

С помощью программного комплекса Ansoft Maxwell была построена компьютерная модель ВБГ. Картина распределения магнитного поля ВБГ мощностью 100 кВт представлена на рис. 13.

Таблица 5

Номинальные данные высокоскоростных беспазового генератора и генератора с зубцовым магнитопроводом мощностью 100 кВт

№	Наименование	ВБГ	ЗМГ (рис 13)
1	Количество фаз, <i>m</i>	3	3
2	Ток фазы, <i>I</i>	155 А	157 А
3	Напряжение фазы, <i>U</i>	220 В	220 В
4	Частота вращения ротора, <i>n</i>	60 000 об/мин	60 000 об/мин
5	Плотность тока, <i>j</i>	18 А/мм ²	1218 А/мм ²
6	Количество пар полюсов, <i>p</i>	1	2
7	Материал постоянных магнитов	Sm ₂ Co ₁₇	Sm ₂ Co ₁₇
8	Толщина постоянных магнитов	10 мм	10 мм
9	Диаметр ротора, <i>d_м</i>	0,06 м	0,06 м
10	Активная длина БМГ, <i>l</i>	0,18 м	0,18 м
11	Действующее значение магнитной индукции в воздушном зазоре, <i>B</i>	0,3 Тл	0,6 Тл
12	Воздушный зазор, <i>δ</i>	10 мм	4 мм
13	Внутренний диаметр статора, <i>D₁</i>	85 мм	68
14	Внешний диаметр статора, <i>D_{вн1}</i>	115 мм	137

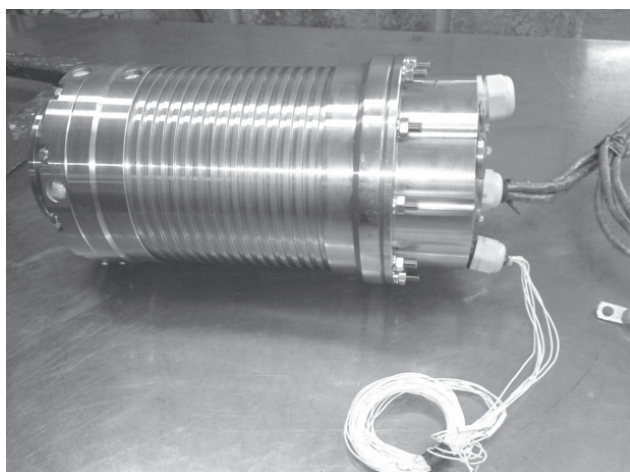


Рис. 12. Высокооборотный генератор с зубцовым магнитопроводом для безредукторной ВСУ

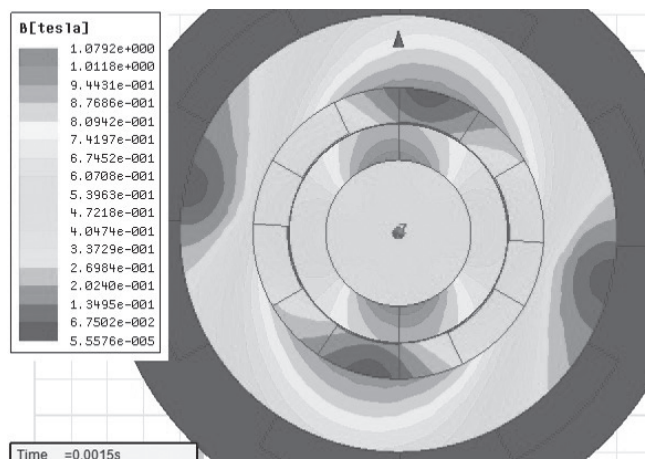


Рис. 13. Картина распределения магнитной индукции в ВБГ

Из рис. 13 видно, что насыщения магнитопровода статора не наблюдается (магнитная индукция насыщения аморфного железа 5БДСР 1,3 Тл) и действующее значение магнитной индукции в воздушном зазоре, равном 10 мм, составляет 0,3 Тл, что удовлетворяет заданным условиям.

Также рассчитаны масса и удельные потери ВБГ (табл. 6).

Таким образом, из полученных результатов видно, что исследуемая конструктивная схема обладает более низкими (на 600 Вт) потерями при более низких массогабаритных показателях, что доказывает перспективность ее применения в авиационной промышленности, так как массогабаритные показатели для авиационной техники являются одним из основных параметров, определяющих эффективность изделия [24, 25].

Выводы

Проведенные расчеты и результаты компьютерного моделирования доказывают, что ВБГ с витым магнитопроводом из аморфного железа может найти применение в качестве генератора безредукторного ВСУ. Было установлено, что ВБГ обладает приемлемыми массогабаритными показателями (в результате расчетов получен показатель не более 0,2 кг/кВт); высоким КПД, по сравнению с ЗМГ безредукторного ВСУ (97–98%); более проста технология изготовления; минимально негативное влияние высших гармоник; отсутствуют зубцовые гармоники. Также исследуемая конструктивная схема обладает более низкими (на 600 Вт) потерями при более низких массогабаритных показателях по сравнению с ЗМГ, что доказывает перспективность ее применения в авиационной промышленности.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 16-38-60001).

Таблица 6

Масса и потери высокоскоростных беспазового генератора и генератора с зубцовым магнитопроводом мощностью 100 кВт

Наименование параметра	ВБГ	ЗМГ (рис 12)
Масса магнитопровода статора, кг	6,27	8,4
Масса медных обмоток статора, кг	2,2	2
Суммарная масса бандажа ротора и экрана статора, кг	0,26	0,26
Масса магнитов, кг	1,93	1,93
Масса вала, кг	1,46	1,46
Общая масса активной части, кг	12	14
Потери в магнитопроводе статора, Вт	86,4	787
Потери в обмотке статора, Вт	1406,3	1300
Средние потери ротора от трения о воздух, Вт	700	700
Суммарные потери, Вт	2192,7	2787
КПД, %	98	97

Библиографический список

1. Wang J., Howe D. Advanced electrical machines for new and emerging applications: Nordic Seminar on «Advanced Magnetic Materials and their Applications». — University of Sheffield (Pori, Finland), 2007. URL: <http://www.prizz.fi/sites/default/files/tiedostot/linkkiIID332.pdf>
2. Van Der Geest M., Polinder H., Ferreira J.A., Zeilstra D. Machine Selection and Initial Design of an Aerospace Starter/Generator // The Proceedings of the IEEE International Electric Machines and Drives Conference, Chicago. 2013, pp. 196-203.
3. Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Вавилов В.Е., Якунов А.М., Бекузин В.И. Применение бесконтактных подшипников в летательных аппаратах // Вестник Московского авиационного института. 2015. Т. 21. № 5. С. 88-100.
4. Карасев Д.А., Арутюнов А.Г., Загордан А.А. К вопросу создания магистральных транспортных самолетов с электрическими силовыми установками // Вестник Московского авиационного института. 2015. Т. 22. № 1. С. 132-139.
5. Rajashekara K., Grieve J. and Daggett D. Hybrid fuel cell power in aircraft // IEEE Industry Applications Magazine. 2008. Vol. 14. No. 4, pp. 54-60.
6. Xin Zhao, Guerrero J.M., Xiaohua Wu. Review of aircraft electric power systems and architectures // Proceedings of the 2014 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON). IEEE International. 2014, pp. 949-953.
7. Jones R.I. The More Electric Aircraft: the past and the future? // IEE Colloquium on Electrical Machines and Systems for the More Electric Aircraft, 1999, pp. 1/1-1/4.
8. Quigley R.E.J. More Electric Aircraft // Proceedings of 8th the Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC'93. 1993, pp. 906-911.
9. Cavagnino A., Li Z., Tenconi A., and Vaschetto S. Integrated Generator for More Electric Engine: Design and Testing of a Scaled-Size Prototype // IEEE Transactions on Industry Applications. 2013. Vol. 49. No. 5, pp. 2034-2043.
10. Tosesti M., Maggiore P., Cavagnino A., and Vaschetto S. Conjugate Heat Transfer Analysis of Integrated Brushless Generators for More Electric Engines // IEEE Transactions on Industry Applications. 2014. Vol. 50. No. 4, pp. 2467-2475.
11. Bojoi R., Cavagnino A., Tenconi A., Vaschetto S. Control of shaft-line-embedded multiphase starter/generator for aero-engine // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2016, pp. 641-652.
12. Rodrigues Leon. High temperature embedded electrical machines for aerospace turbine applications. PhD thesis. University of Sheffield. 2013, 196 p.
13. Croft John. APU manufacturers Honeywell and Hamilton Sundstrand are powering up to meet the demands of next-generation aircraft // Flight International, 5-11/X. 2010. Vol. 178. No. 5260, pp. 39-41.
14. Besnard J.-P., Biais F., Martinez M. Electrical rotating machines and power electronics for new aircraft equipment systems // ICAS-Secretariat — 25th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences. 2006, 9 p.
15. Ganev E. Selecting the Best Electric Machines for Electrical Power Generation Systems // IEEE Electrification Magazine. 2014, pp. 13-22.
16. Zwyssig C., Round S.D. and Kolar J.W. Power Electronics Interface for a 100 W, 500 000 rpm Gas Turbine Portable Power Unit // Applied Power Electronics Conference, Dallas, Texas, USA, 19-23 March 2006, pp. 283-289.
17. Borisavljevic A., Polinder H., Ferreira J. On the Speed Limits of Permanent-Magnet Machines // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2010. Vol. 57. No. 1, pp. 220-227.
18. Abdi B., Milimonfared J., Moghani J. Simplified Design and Optimization of Slotless Synchronous PM Machine for Micro-Satellite Electro-Mechanical Batteries // Advances in Electrical and Computer Engineering. 2009. Vol. 9. No. 3, pp. 84-88.
19. Hong D.K., Woo B.C., Jeong Y.H., Ahn C.W. Development of an Ultra High Speed Permanent Magnet Synchronous Motor // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2013. Vol. 14, pp. 493-499.
20. Zwyssig C., Kolar J.W., Round S.D. Mega-Speed Drive Systems: Pushing Beyond 1 Million RPM // Mechatronics, IEEE/ASME Transactions. 2009. Vol. 14. No. 5, pp. 564-574.
21. Gieras J.F. Advancements in Electric Machines. — Springer, Berlin, 2008, pp. 81-113.
22. Yakupov A., Ismagilov F., Khayrullin I., Vavilov V. Method of Designing High-Speed Generators for the Biogas Plant // International Journal of Renewable Energy Research. 2016. Vol. 6. No. 2, pp. 447-454.
23. Ismagilov F., Vavilov V. Research of the Magnetic Field of High-Speed Magnetolectric Generator // International Review of Electrical Engineering. 2016. Vol. 11. No. 2, pp. 136-141.
24. Romli F.I., Asmadi A.N., Dasuki N. Ergonomics study of vertical seat design for standing cabin concept in commercial transport aircraft // International Review of Aerospace Engineering. 2015. Vol. 8. No. 3, pp. 101-106.
25. Ammar Y., Stambouli A.B., Bekhti M. Design and optimization of microsatellite power system // International Review of Aerospace Engineering. 2015. Vol. 8. No. 4, pp. 141-150.

HIGH-SPEED SLOTLESS GENERATOR, INTEGRATED INTO AUXILIARY POWER UNIT: DESIGN AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE SCALABLE PROTOTYPE

Vavilov V.E.* , Bekuzin V.I.** , Aiguzina V.V.***

Ufa State Aviation Technical University,
USATU, 12, K. Marx str., Ufa, The Republic of Bashkortostan, Russia

* e-mail: s2_88@mail.ru

** e-mail: tiobaldo1@rambler.ru

*** e-mail: vtipy@mail.ru

Abstract

The paper presents the design and experimental research of the high-speed slotless generator scalable prototype with strip-wound stator core, integrated into auxiliary power unit. The experimental research and computer simulation of the scaled-size prototype in no-load and on-load modes were conducted. They revealed that this generator demonstrates minimum rotor losses and voltage ripples, as well as high specific energy characteristics. The high-speed slotless generator scalable prototype computer model was developed with Ansoft Maxwell software. Experimental data deviation from computer simulation results does not exceed 5%. From the results of scalable prototype computer simulation a full scale computer model of high-speed slotless generator was developed. The main parameters of the high-speed slotless generator were defined and compared with the parameters of the slot-type high-speed generator. The comparison revealed that the slotless variant demonstrated lower losses (by 600 W) with minimal weight and size parameters (not more than 0.2 kg/kW), high efficiency, minimal negative high harmonics effect, absence of the slot ripples, and the simple production technology. Thus, the obtained data shows that the high-speed slotless generator with the strip-wound stator core made of amorphous alloy can be implemented as the generator integrated into the auxiliary gearless power unit. It proves also the possibility of its application in aircraft industry.

Keywords: high-speed slotless generator, auxiliary power unit, amorphous alloy, strip-wound stator core.

References

1. Wang J., Howe D. *Advanced electrical machines for new and emerging applications: Nordic Seminar on "Advanced Magnetic Materials and their Applications"*. University of Sheffield (Pori, Finland), 2007, available at: <http://www.prizz.fi/sites/default/files/tiedostot/linkkiIID332.pdf>
2. Van Der Geest M., Polinder H., Ferreira J.A., Zeilstra D. Machine Selection and Initial Design of an Aerospace Starter/Generator. *The Proceedings of the IEEE International Electric Machines and Drives Conference, Chicago*. 2013, pp. 196–203.
3. Ismagilov F.R., Khairullin I.Kh., Vavilov V.E., Yakupov A.M., Bekuzin V.I. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2015, vol. 21, no. 5, pp. 88–100.
4. Karasev D.A., Arutyunov A.G., Zagordan A.A. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2015, vol. 22, no. 1, pp. 132–139.
5. Rajashekara K., Grieve J. and Daggett D. Hybrid fuel cell power in aircraft. *IEEE Industry Applications Magazine*. 2008, vol. 14, no. 4, pp. 54–60.
6. Xin Zhao, Guerrero J.M., Xiaohua Wu. Review of aircraft electric power systems and architectures. *Proceedings of the 2014 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*. 2014, pp. 949–953.
7. Jones R.I. The More Electric Aircraft: the past and the future? *IEE Colloquium on Electrical Machines and Systems for the More Electric Aircraft*, 1999, pp. 1/1–1/4.
8. Quigley R.E.J. More Electric Aircraft. *Proceedings of 8th the Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC'93*. 1993, pp. 906–911.
9. Cavagnino A., Li Z., Tenconi A., Vaschetto S., Integrated Generator for More Electric Engine: Design and Testing of a Scaled-Size Prototype. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2013, vol. 49, no. 5, pp. 2034–2043.
10. Tosetti M., Maggiore P., Cavagnino A., Vaschetto S. Conjugate Heat Transfer Analysis of Integrated Brushless Generators for More Electric Engines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2014, vol. 50, no. 4, pp. 2467–2475.
11. Bojoi R., Cavagnino A., Tenconi A., Vaschetto S. Control of shaft-line-embedded multiphase starter/generator for aero-engine. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, pp. 641–652.
12. Rodrigues Leon. *High temperature embedded electrical machines for aerospace turbine applications*. PhD thesis, University of Sheffield. 2013, 196 p.
13. Croft John. APU manufacturers Honeywell and Hamilton Sundstrand are powering up to meet the demands of next-generation aircraft. *Flight International*, 5-11/X. 2010, vol. 178, no. 5260, pp. 39–41.
14. Besnard J.-P., Biais F., Martinez M. Electrical rotating machines and power electronics for new aircraft

- equipment systems. *ICAS-Secretariat - 25th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences*, 2006, 9 p.
15. Ganev E. Selecting the Best Electric Machines for Electrical Power Generation Systems. *IEEE Electrification Magazine*, 2014, pp. 13-22.
 16. Zwyssig C., Round S.D. and Kolar J.W. Power Electronics Interface for a 100 W, 500 000 rpm Gas Turbine Portable Power Unit. *Applied Power Electronics Conference*, Dallas, Texas, USA, 19-23 March 2006, pp. 283-289.
 17. Borisavljevic A., Polinder H., Ferreira J. On the Speed Limits of Permanent-Magnet Machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, vol. 57, no. 1, pp. 220-227.
 18. Abdi B., Milimonfared J., Moghani J. Simplified Design and Optimization of Slotless Synchronous PM Machine for Micro-Satellite Electro-Mechanical Batteries. *Advances in Electrical and Computer Engineering*, 2009, vol. 9, no. 3, pp. 84-88.
 19. Hong D.K., Woo B.C., Jeong Y.H., Ahn C.W. Development of an Ultra High Speed Permanent Magnet Synchronous Motor. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2013, vol. 14, pp. 493-499.
 20. Zwyssig C., Kolar J.W., Round S.D. Mega-Speed Drive Systems: Pushing Beyond 1 Million RPM. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions*, 2009, vol. 14, no. 5, pp. 564-574.
 21. Gieras J. F. *Advancements in Electric Machines*. Springer, Berlin, 2008, pp. 81-113.
 22. Yakupov A., Ismagilov F., Khayrullin I., Vavilov V. Method of Designing High-Speed Generators for the Biogas Plant. *International Journal of Renewable Energy Research*, 2016, vol. 6, no. 2, pp. 447-454.
 23. Ismagilov F., Vavilov V. Research of the Magnetic Field of High-Speed Magnetolectric Generator. *International Review of Electrical Engineering*, 2016, vol. 11, no. 2, pp. 136-141.
 24. Romli F.I., Asmadi A.N., Dasuki N. Ergonomics study of vertical seat design for standing cabin concept in commercial transport aircraft. *International Review of Aerospace Engineering*, 2015, vol. 8, no. 3, pp. 101-106.
 25. Ammar Y., Stambouli A.B., Bekhti M. Design and optimization of microsatellite power system. *International Review of Aerospace Engineering*, 2015, vol. 8, no. 4, pp. 141-150.