

Экспериментальное исследование фотоэлектрического генератора как альтернативного источника питания сверхпроводящих обмоток возбуждения бесконтактных авиационных электрических машин

КОВАЛЕВ К.Л., МОДЕСТОВ К.А., ДУБЕНСКИЙ А.А., КОВАН Ю.И., ЕГОШКИНА Л.А.

Рассматривается создание альтернативного источника тока для бесконтактного электропитания обмоток возбуждения сверхпроводниковых электрических машин наземного и авиационного применения. По результатам экспериментальных исследований проведен сравнительный анализ выходных характеристик фотоэлектрического генератора на базе модуля TSM-105F в условиях естественного и искусственного освещения. Показана возможность применения фотоэлектрического генератора как альтернативного источника питания сверхпроводящих обмоток возбуждения бесконтактных электрических двигателей и генераторов. Предложены схемы компоновки системы питания вращающихся сверхпроводящих обмоток с применением фотоэлектрического генератора.

Ключевые слова: фотоэлектрический генератор, источник тока, бесконтактное электропитание, генераторы, двигатели, сверхпроводящие обмотки

Статья посвящена описанию системы, которая содержит два источника возобновляемой энергии: фотоэлектрический генератор (ФЭГ) и электромеханический генератор (ЭГ) с приводом от ветроколеса. При этом роль ФЭГ является вспомогательной как для ЭГ, так и для авиационных электродвигателей, приводящих во вращение воздушные винты самолетов или несущие винты вертолетов.

Разработка ФЭГ на летательных аппаратах проводилась в разных странах, однако значительный успех был достигнут в 2015–2016 гг. в ходе выполнения международного проекта на самолете SolarImpulse2 – кругосветного перелета (см. рис. 1) под пилотированием швейцарских летчиков [8]. Использование поверхности самолета для функционирования ФЭГ совместно с аккумуляторными

батареями (АБ) в этом полете показало возможности применения возобновляемых источников электроэнергии на маломестных и беспилотных летательных аппаратах (ЛА) [12].

За рубежом и в России активно разрабатывается [1, 8, 13] концепция полностью электрического самолета, в котором электроэнергия для создания тяги вырабатывается сверхпроводниковым электрическим генератором (СП ЭГ), а затем перераспределяется по сверхпроводящим кабелям к сверхпроводниковым электрическим двигателям (СП СД), приводящим во вращение воздушные винты. Явление сверхпроводимости (отсутствие активного сопротивления) позволяет снизить размеры и массу всей электрической трансмиссии, несмотря на необходимость обеспечения криогенного охлаждения системы.

В Московском авиационном институте совместно с НИИЭлектромеханики (г. Истра) ведутся разработки по созданию СП ЭГ мощностью более 1 МВт [4]. Разрабатываемый генератор даже с учетом системы криорефрижератора становится в 2–2,5 раза меньше по массе, чем генераторы, установленные в энергоустановках мегаваттной мощности.

Конструкция вращающихся частей генераторов и двигателей (роторов) часто содержит медные или алюминиевые катушки, питаемые постоянным током и предназначенные для создания магнитного потока. Электропитание вращающихся катушек можно осуществить разными способами, самый распространенный – применение скользящего



Рис. 1. Экспериментальный самолет SolarImpulse 2 (фотография с сайта)

электрического контакта в паре графит–медь. Однако скользящий контакт быстро изнашивается в разреженной атмосфере (в случае полета ЛА на больших высотах или установки синхронного генератора на высокогорье). Поэтому в настоящее время сохраняется тенденция к проектированию бесконтактных электрических машин (двигателей и генераторов) [14, 15].

Среди бесконтактных способов электропитания в авиации широко используется электромагнитная передача энергии (кольцевой трансформатор с воздушным зазором) или возбудитель на базе синхронной машины. При этом получаемый переменный ток необходимо выпрямлять с заданным уровнем пульсаций, для чего применяют вращающийся выпрямитель (ВВ) на базе полупроводниковых диодов. С целью снижения амплитуды пульсаций ВВ выполняют 6-фазным с 6 диодами. Дальнейшее увеличение числа фаз считается нецелесообразным, так как требует пропорционального увеличения числа диодов при незначительном снижении пульсаций.

В СП катушках даже небольшие пульсации могут приводить к аварийным режимам. Современные СП провода очень чувствительны к температурным колебаниям в основном из-за гистерезисных потерь в сверхпроводнике и потерь от вихревых токов в материале матрицы, возникающих при изменении тока и напряжения [6,7]. Например, в криогенном диапазоне температур $T=63-82\text{K}$ увеличение температуры сверхпроводящего слоя на 1°C на любом отрезке СП провода фирмы American Superconductor уменьшает предельное (критическое) значение тока на 12% [11]. Поэтому снижение пульсаций токов и напряжений в СП катушках является актуальной задачей.

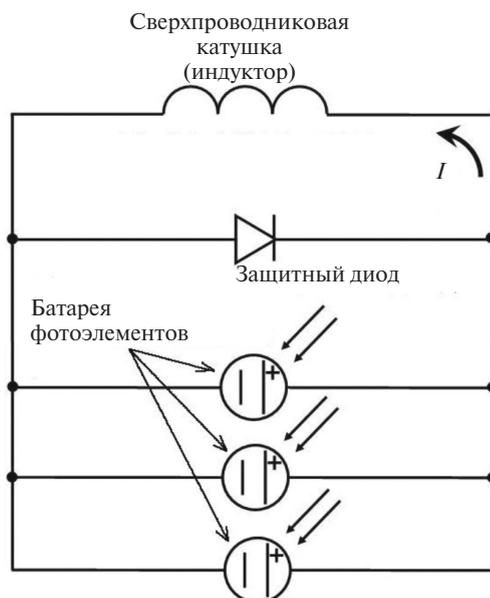


Рис. 2. Принципиальная схема электрической цепи источника питания индуктора

Фотоэлектрический генератор физически представляет собой полупроводниковый диод с нескомпенсированным электрическим потенциалом при освещении полупроводникового перехода. Таким образом, при использовании ФЭГ в качестве источника тока из конструкции СГ исключается возбудитель, его функции передаются полупроводниковым приборам фотоэлектрического генератора, которые необходимо освещать солнечным или искусственным светом.

Принципиальная схема электрической цепи источника питания изображена на рис. 2.

Экспериментальное исследование ФЭГ. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) ФЭГ и СП катушек (рис. 3) являются нелинейными функциями. Характеристика ФЭГ (сплошная линия) соответствует условиям меньшей освещенности Φ , а ВАХ СП катушки (сплошная линия) – условиям более низкой температуры. Так как напряжение на ФЭГ и СП катушке одинаковое, рабочая точка соответствует пересечению их ВАХ.

Пусть при питании СП катушки от ФЭГ рациональные значения напряжения и тока будут соответствовать точке 1. При резком возрастании освещенности поверхности ФЭГ рабочая точка переместится до пересечения ВАХ ФЭГ, соответствующей большей освещенности (штриховая линия), с ВАХ СП катушки (точка 2), т.е. нарастание напряжения и тока в СП катушке будет ограничиваться ВАХ ФЭГ. При этом ток из-за индуктивности цепи будет плавно расти, нагревая СП катушку, ВАХ которой при этом изменится (штриховая линия) и рабочая точка займет теперь положение 3. При возвращении прежнего уровня освещенности рабочая точка переместится в положение 4, но при этом произойдет охлаждение СП катушки, что приведет к исходному рабочему току (точка 1). Таким образом, возникает саморегуляция (ограничение) рабочего тока.

При недостаточной индуктивности катушки в цепь необходимо вводить специальные сверхпро-

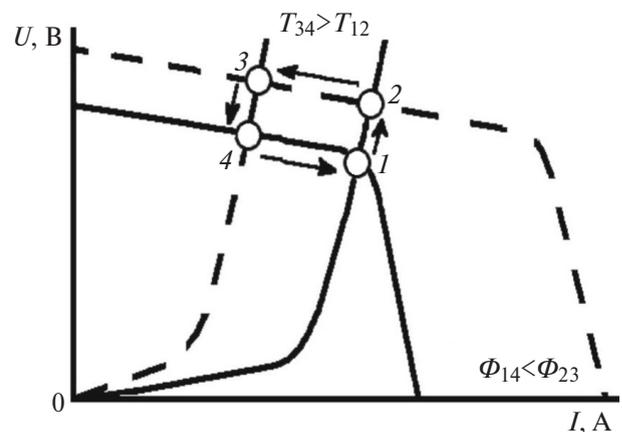


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики ФЭГ и СП катушек

водниковые токоограничители (СОТ), предохраняющие СП катушку от перегрева.

Для проверки практического применения ФЭГ в качестве источника тока было проведено сравнение показателей гибкой фотоэлектрической панели [9] ТСМ-105F, изготовленной в ЗАО «Телеком-СТВ» (г. Зеленоград) [3, 4], при естественном и искусственном освещении.

Фотоэлектрическая панель ТСМ-105F (рис. 4) имеет размеры $1220 \times 573 \times 1,5$ мм, содержит 36 пленочных фотоэлементов (ФЭ) с размерами $12,5 \times 12,5$ мм, соединенных последовательно. Площадь поверхности ТСМ-105F составляет $0,7 \text{ м}^2$. В экспериментах снимались две внешние характеристики ФЭГ: при естественном освещении под прямыми солнечными лучами в безоблачную погоду и при искусственном освещении (4 галогеновые лампы (рис. 5) мощностью 500 Вт в затемненной комнате). Результаты экспериментов представлены на рис. 6.

Из графиков видно, что ток короткого замыкания ТСМ-105F при естественном освещении в 3 раза больше, чем при искусственном при задан-

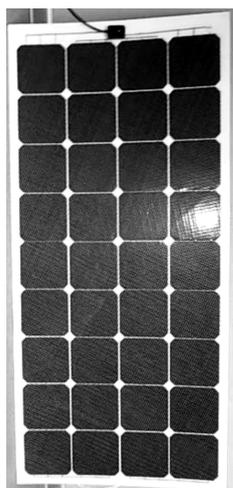


Рис. 4. Фотоэлектрическая панель ТСМ-105F



Рис. 5. Галогеновые лампы на штативе

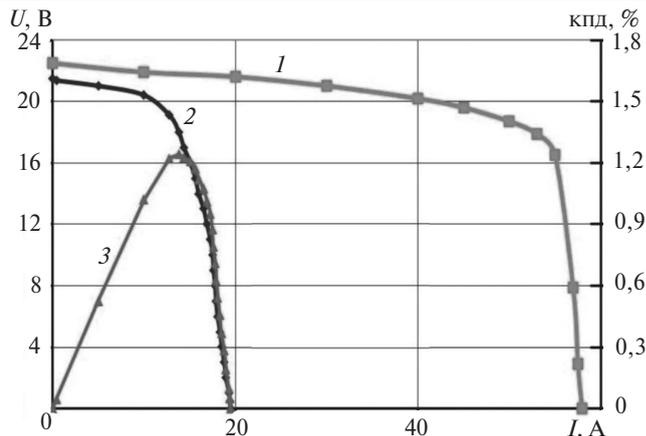


Рис. 6. Выходные характеристики фотоэлектрической панели ТСМ-105F: 1 – при естественном освещении; 2 – при искусственном освещении; 3 – КПД

ных условиях эксперимента. При том же самом искусственном освещении был также определен ток короткого замыкания одного ФЭ, который оказался равным току короткого замыкания всей ТСМ-105F. Это объясняется тем, что увеличение ЭДС ФЭГ за счет последовательного соединения некоторого числа ФЭ сопровождается адекватным увеличением внутреннего сопротивления ФЭГ. У одного ФЭ значение ЭДС холостого тока составляло примерно 0,6 В.

Таким образом, при параллельном включении всех 36 ФЭ на панели ТСМ-105F можно получить суммарный ток короткого замыкания до 72 А, используя галогеновое освещение с потребляемой мощностью 2 кВт. В режиме максимальной мощности ($P_{\max} = 24$ Вт) КПД ТСМ-105F составлял 1,25% при токе 1,4 А и напряжении 18 В.

Указанные выше эксперименты проводились в течение нескольких десятков секунд во избежание перегрева ФЭГ от теплового излучения. В длительных режимах необходимо обеспечить эффективное (воздушное) охлаждение ФЭ.

На рис. 7 приведены ВАХ двух катушек с разным числом витков, изготовленных из высокотемпературного сверхпроводящего провода (ВТСП) фирмы American Superconductor. Катушка № 1 имеет 30 витков, катушка № 2 – 40 витков. Видно, что с увеличением числа витков рабочий ток существенно падает. Снижение тока в катушке с большим числом витков связано с полевой зависимостью предельных токов в ВТСП проводах.

Эксперименты [4] показывают, что резкое возрастание напряжения в ВТСП проводах обратимо и не приводит к их деградации. Следовательно, саморегулирование тока примерно 50–60 А в цепи, состоящей из параллельно включенных ФЭ и ВТСП катушки, при температурах жидкого азота представляется возможным.

На рис. 8 в относительных единицах показаны ВАХ ФЭГ и ВАХ ВТСП при параллельном их

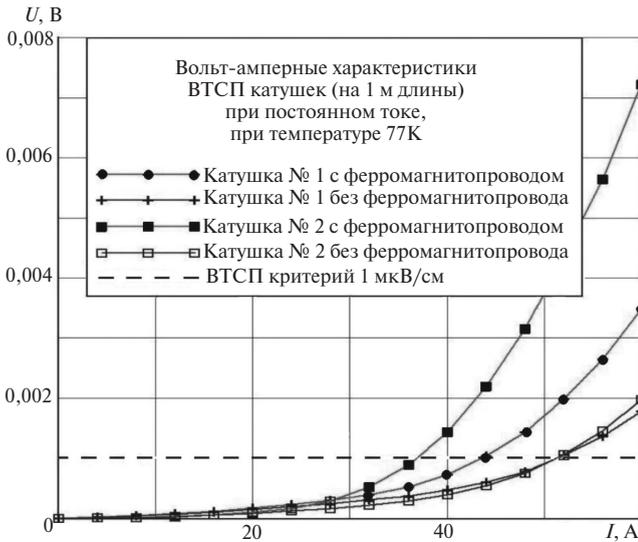


Рис. 7. Вольт-амперные характеристики СП катушек

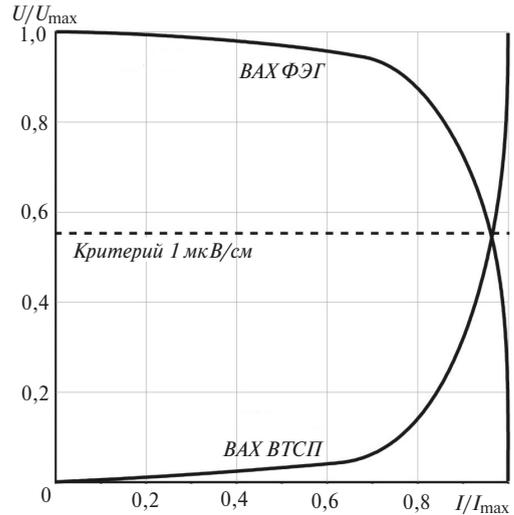


Рис. 8. Экспериментальные вольт-амперные характеристики ФЭГ и СП катушек

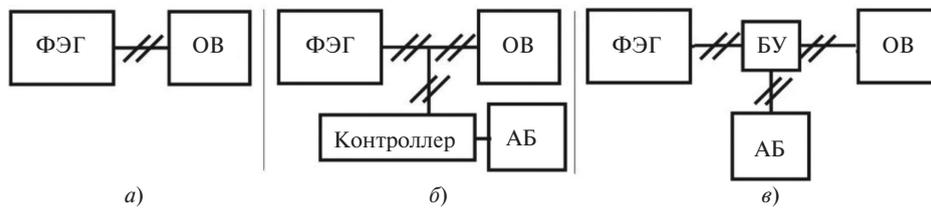


Рис. 9. Схемы реализации питания СП обмоток возбуждения

включении. Рабочая точка (точка пересечения ВАХ) будет характеризоваться значением падения напряжения на ВТСП катушке. При этом U_{max} соответствует максимальному значению ЭДС, вырабатываемому солнечной батареей, а I_{max} – резкому нарастанию напряжения на ВТСП катушке.

Перспективы использования ФЭГ в системах питания сверхпроводниковых обмоток возбуждения. На рис. 9 представлены возможные схемы реализации питания СП обмоток возбуждения. В самой простой схеме (рис. 9,а) регулирование тока возможно только за счет изменения светового потока. В схеме с параллельной работой ФЭГ и аккумуляторной батареи (АБ) устанавливается контроллер, регулирующий ток заряда и разряда (рис. 9,б). В противном случае срок службы дорогостоящей АБ будет существенно сокращен. В общем случае контроллер АБ и ограничитель тока СП катушки целесообразно объединить в единый блок управления током с беспроводным каналом связи между вращающимся ротором и неподвижной частью системы управления (рис. 9,в). В случае неподвижной обмотки возбуждения, расположенной на статоре машины, задача упрощается.

На рис. 10 изображена компоновка ФЭГ на летательном аппарате для случая расположения обмотки возбуждения на роторе. На самолетах гибкие пленочные ФЭ устанавливаются на обтекателе воздушного винта, причем как на конической поверх-

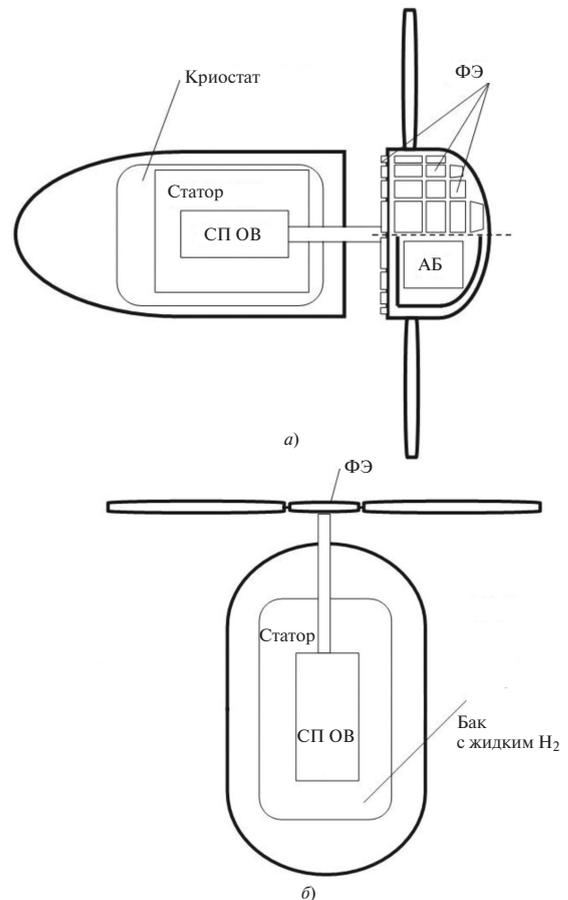


Рис. 10. Компоновка ФЭГ на летательном аппарате: а – самолет; б – вертолет

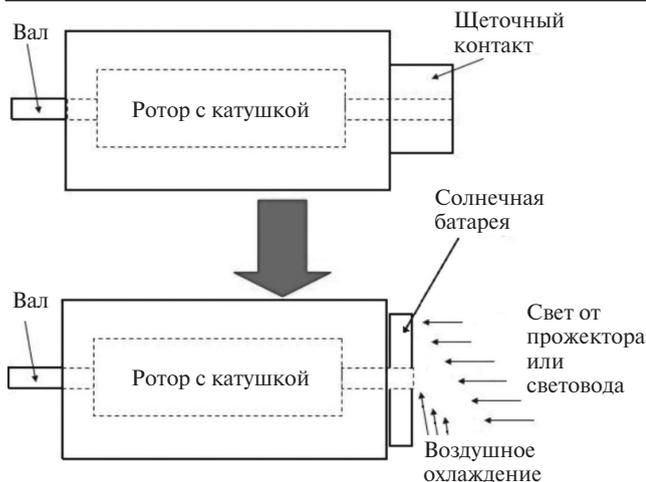


Рис. 11. Компоновка ФЭГ на наземном генераторе

ности, так и на торцевой. В этом случае коническая поверхность освещается солнечным светом, а торцевая — искусственным с регулируемым световым потоком. На вертолетах и квадрокоптерах обтекатель крестовины несущего винта имеет большую плоскую поверхность и лучшие условия освещенности. Кроме того, вертикальное положение оси несущего винта позволяет отказаться от вращающегося уплотнения, предотвращающего протечки криоагента (жидкий водород или азот). В случае неподвижной обмотки возбуждения для формирования её тока могут использоваться ФЭ, расположенные на корпусе самолета.

Летательные аппараты (рис. 10) могут найти широкое применение, например, для транспортировки криогенных жидкостей [5]. При этом электродвигатели могут играть вспомогательную роль в сочетании с традиционными поршневыми двигателями.

При наземном применении большие размеры генератора менее критичны, поэтому вращающийся ФЭГ может быть выполнен с увеличенной площадью поверхности без изменений габаритов мощных СГ с диаметром статора 1–2 м (рис. 11). При этом общая длина СГ сокращается за счет тонкостенной дисковой конструкции ФЭГ.

Также возможно применение специальных концентраторов солнечного излучения, позволяющих увеличивать световой поток на ФЭ [10].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда. Проект № 17-19-01269.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Luongo C.A., Masson P.J., Nam T. Next Generation More-Electric Aircraft: A Potential Application for HTS Superconductors. — IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2009, vol. 19, No. 3, pp. 1055–1068.
2. Untila G., Kost T., Chebotareva A. Comparison of (N+PP+) CZ-Si solar cells with arc of ITO deposited by magnetron sputtering and ITO deposited by spray pyrolysis. — Proc. 21th European Photovoltaic Solar Energy Conf., 2006, Dresden, Germany, pp. 1261–1263.
3. Untila G., Kost T., Chebotareva A. Reliability of pulsed measurements of solar cell parameters. — Proc. 20th European Photovoltaic Solar Energy Conf., 6–11, 2005, Barcelona, Spain, pp. 144–147.
4. Kovalev K.L., Verzhbitsky L.G., Kozub S.S. Brushless superconducting synchronous generator with claw-shaped poles and permanent magnets. — IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, vol. 26, No. 3.
5. Ковалев К.Л., Дежин Д.С., Иванов Н.С. Оценка перспектив увеличения удельной мощности электрических машин для БЭС и ПЭС. — Вестник РГАТУ им. П.А. Соловьева, 2015, № 4 (35), с. 9–16.
6. Дежин Д.С., Иванов Н.С., Кобзева И.Н. Полностью сверхпроводниковая электрическая машина с высокой удельной мощностью. — Электротехника, 2018, № 2, 2–7.
7. Kovalev K.L., Kovalev L.K., Poltavets V.N. Synchronous Generator with HTS-2G field coils for Windmills with output power 1 MW. — 11th European Conf. on Applied Superconductivity (EUCAS2013) IOP Publishing Journal of Physics: Conf. Series 507, 2014, 4 p.
8. Тулинова Е.Е., Ковалев К.Л., Иванов Н.С., Ларионов А.Е. Обзор разработок полностью электрических самолетов. — Электричество, 2016, № 4, с. 15–25.
9. Пат. РФ № 2526219. Фотоэлектрический гибкий модуль/В.С. Белоусов, С.В. Вильдяева, М.В. Гришин. — БИ, 2014, № 25.
10. Пат. РФ № 2377696. Концентраторный фотоэлектрический модуль/А.В. Алексеев, В.С. Белоусов, Б.Л. Эйдельман. — БИ, 2009, № 36.
11. ПИА NEWS ITEMS [Электрон. ресурс] http://www.amsc.com/library/AMPicBT_AN_A4_0112.pdf (дата обращения 01.03.2019).
12. Solar Impulse Foundation [Электрон. ресурс] <https://solarimpulse.com/> (дата обращения 01.03.2019).
13. Электрический самолет: концепция и технологии/Под ред. С.М. Мусина. Уфа: УГАТУ, 2014, 388 с.
14. Пат. РФ № 169041. Сверхпроводниковая синхронная электрическая машина/К.Л. Ковалев, И.Н. Кобзева, Б.С. Зечихин, Ю.И. Кован, В.С. Семенихин, Н.С. Иванов, Л.А. Егошкина. — БИ, 2017, № 7.
15. Пат. РФ № 2664716. Сверхпроводниковая синхронная электрическая машина с обмотками якоря и возбуждения в неподвижном криостате/К.Л. Ковалев, А.А. Дубенский, К.А. Модестов, Н.С. Иванов, В.Т. Пенкин, Л.А. Егошкина, А.Е. Ларионов. — БИ, 2018, № 24.

[04.03.2019]

А в т о р ы: Ковалев Константин Львович — доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой Национального исследовательского университета «Московский авиационный институт» — НИУ «МАИ», диссертацию защитил в 2005 г.

Модестов Кирилл Андреевич — кандидат техн. наук, доцент НИУ «МАИ», диссертацию защитил в 2005 г.

Дубенский Александр Андреевич — младший научный сотрудник НИУ «МАИ», диссертацию защитил в 2018 г.

Кован Юрий Игоревич — кандидат техн. наук, доцент, старший научный сотрудник НИУ «МАИ», диссертацию защитил в 1973 г.

Егошкина Людмила Александровна — кандидат техн. наук, старший научный сотрудник НИУ «МАИ», диссертацию защитила в 1987 г.

An Experimental Investigation of a Photovoltaic Generator as an Alternative Source of Power Supply for the Superconducting Excitation Windings of Contactless Aircraft Electric Motors and Generators

KOVALEV Konstantin L. (*National Research University «Moscow Aviation Institute» – NRU «MAI», Moscow, Russia*) – Professor, Head of the Department, Dr. Sci. (Eng.)

MODESTOV Kirill A. (*NRU «MAI», Moscow, Russia*) – Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

DUBENSKY Alexander A. (*NRU «MAI», Moscow, Russia*) – Younger Scientist, Cand. Sci. (Eng.)

KOVAN Yuri Ig. (*NRU «MAI», Moscow, Russia*) – Associate Professor, Senior Scientist, Cand. Sci. (Eng.)

EGOSHKINA Ludmila A. (*NRU «MAI», Moscow, Russia*) – Senior Scientist, Cand. Sci. (Eng.)

The article considers development of an alternative current source for contactless electric power supply to superconducting excitation windings of electrical machines for on-land and aircraft applications. Based on the results of experimental investigations, the output characteristics of a photovoltaic generator constructed on the basis of the TCM-105F module and operating under the conditions of natural and artificial lighting are subjected to a comparative analysis. The possibility of using the photovoltaic generator as an alternative source of power supply for the superconducting excitation windings of contactless electrical motors and generators is shown. Schematic layouts of the power supply system for rotating superconducting windings with the use of a photovoltaic generator are proposed.

Key words: *photovoltaic generator, current source, contactless electric power supply, generators, motors, superconducting windings*

REFERENCES

1. **Luongo C.A., Masson P.J., Nam T.** Next Generation More-Electric Aircraft: A Potential Application for HTS Superconductors. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2009, vol. 19, No. 3, pp. 1055–1068.
2. **Untila G., Kost T., Chebotareva A.** Comparison of (N+PP+) CZ-Si solar cells with arc of ITO deposited by magnetron sputtering and ITO deposited by spray pyrolysis. – Proc. 21th European Photovoltaic Solar Energy Conf., 2006, Dresden, Germany, pp. 1261–1263.
3. **Untila G., Kost T., Chebotareva A.** Reliability of pulsed measurements of solar cell parameters. – Proc. 20th European Photovoltaic Solar Energy Conf., 6–11, 2005, Barcelona, Spain, pp. 144–147.
4. **Kovalev K.L., Verzhbitsky L.G., Kozub S.S.** Brushless superconducting synchronous generator with claw-shaped poles and permanent magnets. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, vol. 26, No. 3, 4 p.
5. **Kovalev K.L., Dezhin D.S., Ivanov N.S.** *Otsenka perspektiv uvelicheniya udel'noi moshchnosti elektricheskikh mashin dlya BES i PES* (Assessment of prospects for increasing the specific power of electric machines for BES and PES.) Bulletin RGATU name P.A.Soloviov, 2015, No. 4 (35), pp. 9–16.
6. **Dezhin D.S., Ivanov N.S., Kobzeva I.N.** *Elektrotekhnika – in Russ. (Electrical Engineering)*, No. 2, 2018, pp. 2–7.
7. **Kovalev K.L., Kovalev L.K., Poltavets V.N.** Synchronous Generator with HTS-2G field coils for Windmills with output power 1 MW. – 11th European Conf. on Applied Superconductivity (EUCAS2013) IOP Publishing Journal of Physics: Conf. Series 507, 2014, 4 p.
8. **Tulinova Ye.Ye., Kovalev K.L., Ivanov N.S., Larionov A.Ye.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2016, No. 4, p. 15–25.
9. **Pat. No.2526219 (RU).** *Fotoelektricheskiy gibkiy modul* (Photovoltaic flexible module)/ V.S. Belousov, S.V. Vil'dyaeva, M.V. Grishin. Bulletin of inventions, 2014, No. 25.
10. **Pat. No. 2377696 (RU).** *Kontsentratornyi fotoelektricheskii modul* (Concentration photovoltaic module)/A.V. Alekseyev, V.S. Belousov, B.L. Eidel'man. Bulletin of inventions, 2009, No. 36.
11. **ITIA NEWS ITEMS** [Electron. resourse] http://www.amsc.com/library/AMPicBT_AN_A4_0112.pdf. (Data of appeal 01.03.2019).
12. **Solar Impulse Foundation** [Electron. resourse] <https://solarimpulse.com/> (Data of appeal 01.03.2019).
13. **Elektricheskiy samolet: kontsepsiya i tehnologii** (Electric aircraft: concept and technology)/Edit. by S.M. Musin, Ufa, Publ. of UGATU, 2014, 388 p.
14. **Pat. No. 169041 (RU).** *Sverkhprovodnikovaya sinkhronnaya elektricheskaya mashina* (Superconducting synchronous electric machine)/K.L. Kovalev, I.N. Kobzeva, B.S. Zechikhin, Yu.I. Kovan, V.S. Semenikhin, N.S. Ivanov, L.A. Egoshkina. Bulletin of inventions, 2017, No. 7.
15. **Pat. No. 2664716 (RU).** *Sverkhprovodnikovaya sinkhronnaya elektricheskaya mashina s obmotkami yakorya i vobuzhdeniya v nepodvizhnom kriostate* (Superconducting synchronous electric machine with armature and excitation windings in stationary cryostat)/K.L. Kovalev, A.A. Dubensky, K.A. Modestov, N.S. Ivanov, V.T. Penkin, L.A. Egoshkina, A.Ye. Larionov. Bulletin of inventions, 2018, No. 24.

[04.03.2019]