

Изготовление и испытание высокотемпературной сверхпроводниковой катушки для макета двигателя беспилотного летательного аппарата

ЗАНЕГИН С.Ю., ИВАНОВ Н.С., ШИШОВ Д.М., ШИШОВ И.М.,
КОВАЛЕВ К.Л., ЗУБКО В.В.

Использование в электрических машинах обмоток на основе высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) позволяет увеличить эффективность машин за счет существенно более высокой допустимой токовой нагрузки, а также снизить массу и габаритные размеры, что делает возможным создание принципиально новых систем. Однако еще не до конца исследована работа ВТСП обмоток на переменном токе. В частности, критические параметры ВТСП катушки и короткого ВТСП образца существенно отличаются. Кроме того, при работе устройств на переменном токе в них возникают потери, в том числе в сверхпроводнике, правильное определение которых необходимо при разработке криогенной системы. В статье описан технологический процесс создания катушки типа рейстрек из ВТСП ленты второго поколения (2G ВТСП ленты), а также представлены результаты ее испытаний при температуре жидкого азота и различных значениях питающего напряжения. На основе полученных экспериментальных данных определены потери в ВТСП катушке на переменном токе. Результаты работы использованы при проектировании электродвигателя для беспилотного летательного аппарата.

К л ю ч е в ы е с л о в а: высокотемпературная сверхпроводимость, потери на переменном токе, результаты испытания ВТСП катушек, электродвигатель для беспилотного летательного аппарата

Использование обмоток на основе высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) в электрических машинах позволяет увеличить их эффективность за счет существенно более высокой допустимой токовой нагрузки, а также снизить массу и габаритные размеры, при этом появляется возможность создания принципиально новых систем, например полностью электрического беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Однако до настоящего времени не известны образцы летательных аппаратов, имеющих на борту сверхпроводниковые устройства [11].

В мире уже созданы электрические машины с использованием ВТСП обмоток, работающих на постоянном токе [7–9], но их удельные параметры оказываются недостаточно высокими для применения в БПЛА. Именно поэтому ведущие мировые научные центры проводят работы по созданию работающих на переменном токе электрических машин, обмотки статора которых выполнены из ВТСП проводов. При этом возникает множество научно-технических задач. В частности, критические параметры ВТСП катушки и короткого ВТСП образца существенно отличаются. Кроме того, при работе устройств на переменном токе возникают потери, в том числе в сверхпроводнике, правильное определение которых необходимо при разра-

ботке криогенной системы. До сих пор в литературе слабо освещен вопрос работы ВТСП катушек при питании их импульсным напряжением, формируемым с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Такой режим реализуется при управлении электрической машиной большинством современных силовых электронных преобразователей.

В статье описан технологический процесс создания катушки типа рейстрек из ВТСП ленты второго поколения (2G ВТСП ленты), а также даны результаты ее испытаний при температуре жидкого азота и разных значениях питающего напряжения. Кроме того, на основе полученных экспериментальных данных определены потери в ВТСП катушке на переменном токе. Результаты использованы при проектировании электродвигателя для беспилотного летательного аппарата.

Изготовление ВТСП катушки. Специализированное намоточное устройство. В результате электромагнитного расчета электродвигателя для БПЛА получены его обмоточные параметры. Действующее значение тока фазы должно составлять 41 А, что позволяет применить в качестве токнесущего элемента единичную 2G ВТСП ленту. С целью минимизации размеров выбрана обмотка типа «двойная галета». Подобная конструкция при сохране-

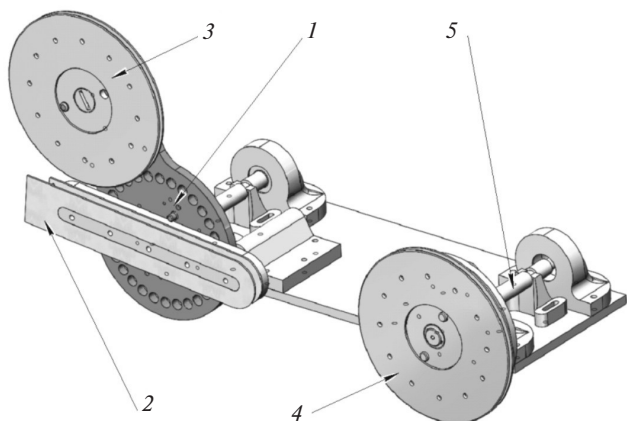


Рис. 1. Схема намоточного устройства для изготовления ВТСП обмоток типа «двойная галета»

нии компактных габаритов обеспечивает расчетное число витков, при этом оба вывода катушки расположены снаружи, что позволяет избежать трудностей с подведением тока к концу ленты, находящемуся на внутреннем слое, в случае традиционной однослойной катушки. Однако у данного типа обмотки существует следующая особенность технологии изготовления: намотку требуется делать из середины, что требует специализированного оборудования.

Для сокращения сроков и стоимости изготовления первого опытного образца разработано и изготовлено специализированное намоточное устройство (рис. 1). Оно состоит из основного вала с планшайбой 1, на которой закреплен каркас изготавливаемой обмотки 2. На планшайбе также закреплена неподвижная (относительно каркаса обмотки) кассета 3 с половиной длины ВТСП ленты. На дополнительном валу 5 закреплена отдающая кассета 4 со второй половиной ленты.

Требуемое натяжение ленты создается с помощью троса, закрепленного на дополнительном валу, и системы блоков с грузом (не показаны). В процессе намотки сначала на каркас сматывается лента с отдающей катушки, затем пустая кассета снимается с дополнительного вала и ее место занимает кассета, ранее закрепленная на планшайбе. Практически все детали данного устройства за исключением осей и подшипников изготовлены на FDM-3D принтере, что обеспечило превосходную технологичность, а также значительно снизило стоимость и трудоемкость изготовления.

Испытуемый образец. На вышеописанном устройстве была изготовлена катушка из 2G ВТСП ленты производства AMSC. Размер ленты 5×0,5 мм с изоляцией. Катушка имеет 24 витка, по 12 в слое, суммарная длина ленты 5 м. Каркас катушки предусматривает возможность установки ферромагнитного сердечника для имитации магнитопровода. В процессе намотки осуществлялось компаундиро-

вание с помощью эпоксидной смолы марки «Loctite Stycast 2850» [5]. Для подключения источника питания к выводным концам-токовводам катушки припаяны два силовых медных провода. Выводы потенциальных контактов расположены в точках, максимально отдаленных от токовводов для минимизации переходных эффектов. Индуктивность катушки составила 0,051 мГн без сердечника и 0,072 мГн с установленным сплошным сердечником.

Экспериментальные исследования. Различные источники [1–3] приводят данные для потерь в коротких образцах ВТСП ленты, кабелях и катушках при питании синусоидальным током и напряжением. Здесь рассмотрены параметры ВТСП катушки при питании ее током различной формы, частоты и амплитуды. Так как предполагается, что катушки, подобные испытываемой, будут представлять собой обмотки малоразмерного ВТСП двигателя для БПЛА, то, соответственно, в качестве источника питания будет электронный силовой преобразователь (инвертор). Большинство современных регуляторов электродвигателей формируют фазные напряжения с помощью ШИМ, поэтому токи зачастую имеют существенно несинусоидальную форму и широкий спектр высших гармоник.

Первым этапом исследований стало определение критического тока I_c и параметра нарастания ВТСП обмотки n изготовленной катушки, которые определялись из аппроксимации вольт-амперной характеристики $E(I)$ обмотки степенной зависимостью:

$$E(I) = E_c \left(\frac{I}{I_c} \right)^n, \quad (1)$$

где $E_c = 11$ мкВ/см.

В результате испытаний критический ток ВТСП обмотки составил 81 А при паспортном значении для ВТСП ленты 106 А. В процессе намотки ленты изгиб ВТСП ленты на радиусах каркаса приводит к деградации критического тока, поэтому особенно важно установить факт, что критический ток ВТСП катушки с достаточным запасом превышает номинальный ток фазы. Снижение критического тока примерно на 20% в данном случае можно считать приемлемым, так как радиус изгиба ленты при намотке был близок к предельно допустимому значению, по данным производителя ВТСП ленты [10]. Параметр нарастания n ВТСП обмотки составил 23.

Вторым этапом были исследования на переменном токе различных значений частоты (измерение потерь). Для эксперимента выбраны фиксированные частоты 50, 100 и 200 Гц. Потери измерялись электрическим методом, который основан на пря-

мом измерении мгновенных значений тока и напряжения в катушке. В соответствии с определением активная мощность, соответствующая энергии, преобразуемой на участке цепи в тепловую, выражается соотношением [4]:

$$P = \frac{1}{t_m} \int_0^{t_m} u i dt, \quad (2)$$

где u, i – мгновенные значения напряжения и тока; t_m – время измерений, составляющее несколько периодов.

Измерения проводились на испытательном стенде (рис. 2), включающем управляемый источник тока I , резистивный токовый шунт $R_{ш}$ и испытуемую катушку L . Форма и амплитуда тока задается внешним генератором сигналов $U1$, а сигналы $C1$ и $C2$ с токового шунта и потенциальных контактов $П1$ и $П2$ катушки поступают на плату АЦП компьютера под управлением ПО LabView [6].

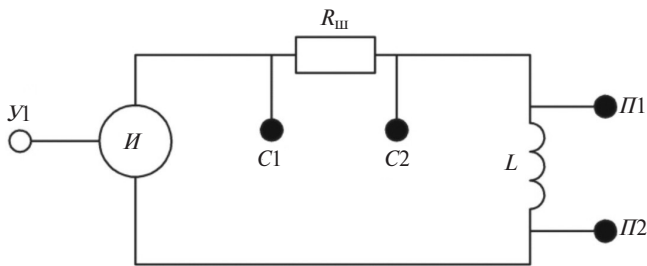


Рис. 2. Схема испытательного стенда для испытаний ВТСП катушки на переменном токе

Первоначально потери измерялись на синусоидальном токе при наличии и отсутствии у катушки стального (ферромагнитного) сердечника, результаты измерений приведены на рис. 3,а. Затем измерения потерь проводились при питании знакопеременным током прямоугольной формы (меандр). На рис. 3,б приведены результаты измерения потерь при прямоугольном сигнале, при наличии и отсутствии в катушке стального сердечника. При установке стального сердечника значение потерь возрастает вследствие гистерезисных потерь в сердечнике.

Сравнивая результаты измерений (рис. 3,а и б), видно, что при одинаковой частоте значения потерь ниже в случае питания катушки синусоидальным током по сравнению с прямоугольным сигналом, что обусловлено отсутствием высших гармоник в первом случае и большим числом высших гармоник во втором.

Важно отметить, что в данном случае ток имел значительные всплески в момент нарастания (рис. 4,а и б), что обусловлено особенностями работы лабораторного источника питания в режиме источника тока.

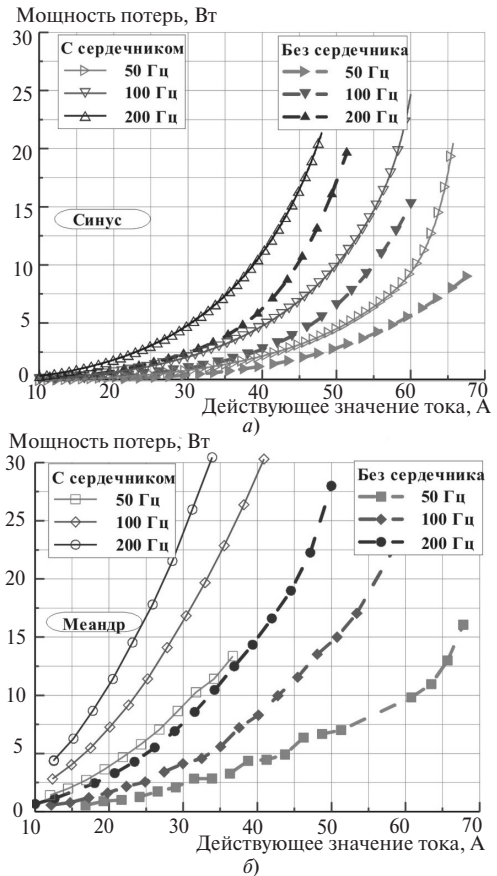


Рис. 3. Измеренные потери: а – на синусоидальном токе (катушка с сердечником и без него); б – на меандре (катушка с сердечником и без него)

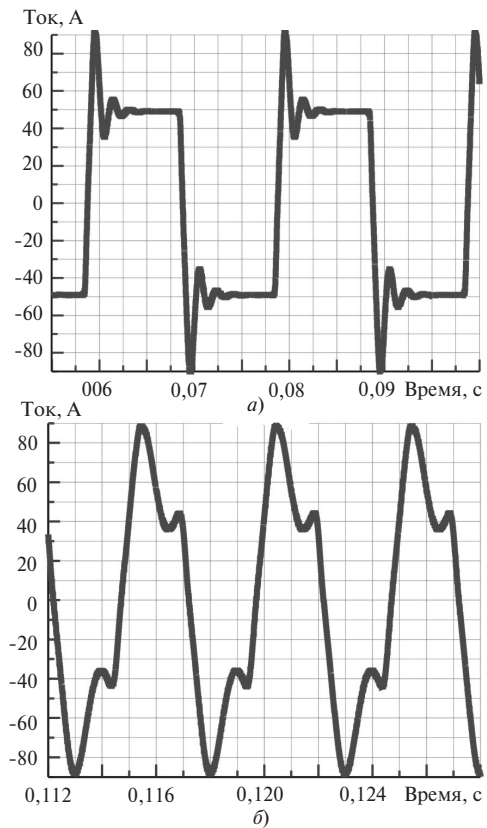


Рис. 4. Форма тока в катушке: а – частота 50 Гц; б – частота 200 Гц

Также был проведен эксперимент, имитирующий работу катушки от силового преобразователя (инвертора). С этой целью собран Н-мост (рис. 5), состоящий из четырех IGBT транзисторов $K1 \div K4$. Сигналы управления $U1 \div U4$ подаются на затворы от внешней системы управления, позволяющей путем коммутации ключей создать на нагрузке L ШИМ модулированный знакопеременный ток (рис. 6,а).

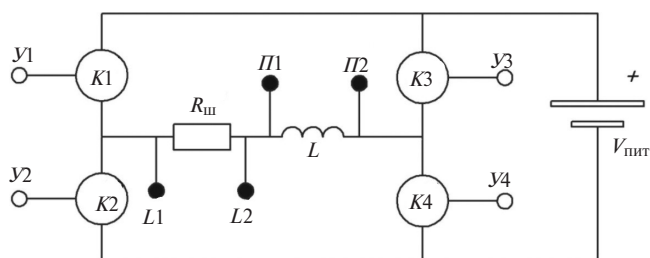


Рис. 5. Схема испытательного стенда для исследования ВТСП катушки при питании от инвертора

Сигналы $C1$ и $C2$ с токового шунта и потенциальных контактов $П1$ и $П2$ катушки поступают на плату АЦП компьютера под управлением LabView. Частота ШИМ составила 10 кГц (рис. 6,б).

Результаты измерений, как и прежде, сравниваются со случаем синусоидального тока в катушке без сердечника (рис. 7). Графики показывают, что при увеличении амплитуды питающего тока значе-

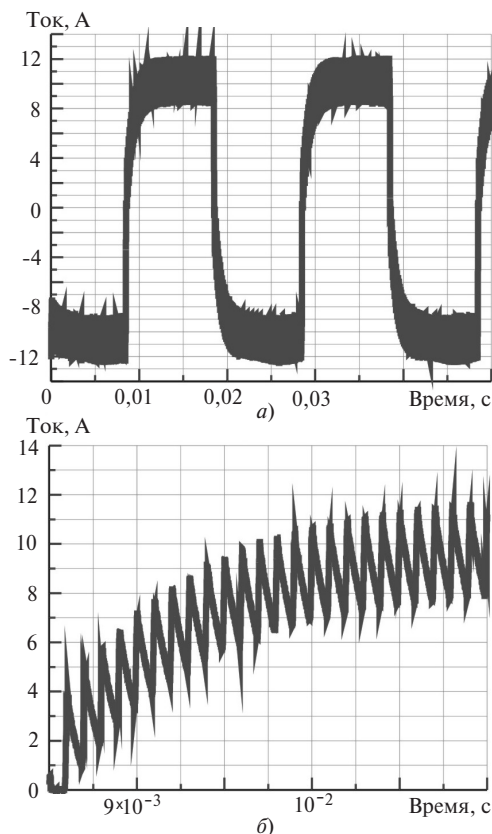


Рис. 6. ШИМ-форма тока в катушке: а — основная частота 50 Гц; б — увеличенный участок нарастания тока, видны осцилляции на частоте ШИМ 10 кГц

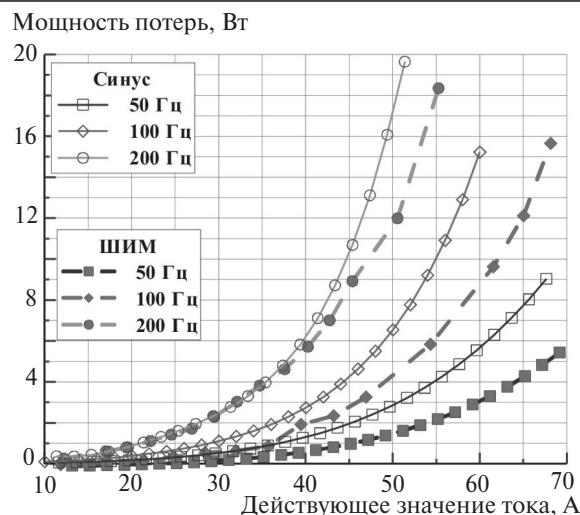


Рис. 7. Сравнение измеренных потерь на синусоидальном токе и ШИМ

ние потерь в катушке увеличивается, при этом потери при синусоидальном сигнале оказываются выше.

Выводы. 1. Создана и апробирована технология изготовления ВТСП обмотки электродвигателя для БПЛА. Изготовленная с помощью разработанного стенда ВТСП катушка испытана различными по форме и частоте токами с целью определения значения потерь на переменном токе. Этот параметр является одним из важнейших при проектировании криогенной системы любого сверхпроводящего устройства, в том числе для бортовых энергетических систем.

2. Измерения потерь показали, что в случае питания катушки от силового преобразователя не возникает дополнительных потерь, связанных с высокой частотой ШИМ. Напротив, уровень потерь оказался ниже, чем при питании синусоидальным током, что, вероятнее всего, обусловлено наличием в течение периода участков с постоянным током, на которых отсутствуют потери мощности в сверхпроводнике.

3. Попытка сформировать меандр в катушке дала, напротив, повышенный уровень потерь, обусловленный особенностями работы лабораторного источника питания в режиме источника тока с индуктивной нагрузкой. В то же время представляют интерес исследования потерь в катушке на меандре, сформированном с помощью ШИМ с более высокими значениями частоты ШИМ (20–50 кГц), а также более крутыми фронтами нарастания тока в катушке, что требует существенной модернизации испытательных стендов.

4. Полученные результаты подтверждают возможность создания ВТСП электродвигателя при заданных параметрах и позволяют приступить к созданию первого в мире летательного аппарата с ВТСП электродвигателем на борту.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №18-79-00306).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. de Bruyn B.J., Jansen J.W., Lomonova E.A. AC losses in HTS coils for high-frequency and non-sinusoidal currents. — Supercond. Sci. Technol., 2017, vol. 30, No. 9.
2. Zubko V., Fetisov S., Vysotsky V. Hysteresis Losses Analysis in 2G HTS cables. — IEEE Trans. Appl. Supercond., 2016, vol. 26, No. 3.
3. Ogawa J., Fukui S., Oka T., Sano Y., Ogawa M., Ranecky S. Experimental Investigation of AC Loss Characteristics in HTS Tape With Rotating Magnetic Field. — IEEE Trans. Appl. Supercond., 2017, vol. 27, No. 4.
4. Казовский Е.Я., Карцев В.П., Шахтарин В.Н. Сверхпроводящие магнитные системы. Л.: Наука, 1967, 323 с.
5. LOCTITE STYCAST [Электрон. ресурс] https://www.henkel-adhesives.com/us/en/product/potting-compounds/loctite_stycast_2850ftbl.html (дата обращения 09.01.2019).
6. LabVIEW [Электрон. ресурс] <http://www.ni.com/ru-ru/shop/labview.html> (дата обращения 09.01.2019).
7. Kovalev K.L., Verzhbitsky L.G., Kozub S.S., Penkin V.T., Larionov A.E., Modestov K.A., Ivanov N.S., Tulinov E.E., Dubensky A.A. Brushless superconducting synchronous generator with claw-shaped poles and permanent magnets. — IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 26, iss. 3, April 2016, Article number 7405291, DOI: 10.1109/TASC.2016.2528995.
8. Ye Yang, Shiyang Duan, Yi Ren, Yudong Jiang, Ling Feng, Xiao Zhang, Haibo Chai, Mingwei Kuang, Jiandong Wu, Xinsheng Yang and Yong Zhao. Design and Development of a Cryogen-free Superconducting Prototype Generator with YBCO Field Windings. DOI 10.1109/TASC.2016.2514349. — IEEE Transactions on Applied Superconductivity.
9. Magnusson N., Paulsen M., Eliassen J.C., Abrahamsen A.B., Helleson S.M., Runde M., Nysveen A., Moslett L.E., Bjerkli J., King P. Fabrication of a Scaled MgB₂ Racetrack Demonstrator Pole for a 10-MW Direct-Drive Wind Turbine Generator. — IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, vol. 28, iss. 4.
10. Amperium[®] Copper Laminated Wire [Электрон. ресурс] https://www.amsc.com/wp-content/uploads/CPRAMP8501_8502_DS_A4_0414_WEB.pdf (дата обращения 09.01.2019).
11. Ковалев К.Л., Иванов Н.С., Ильясов Р.И., Некрасова Ю.Ю., Пенкин В.Т., Дежин Д.С., Журавлев С.В. Перспективы применения сверхпроводниковых устройств на борту полностью электрического самолета с гибридной силовой установкой. — Электричество, 2018, № 10, с. 45–60.

[21.01.2019]

А в т о р ы: Занегин Сергей Юрьевич — аспирант Национального исследовательского университета «Московский авиационный институт» — НИУ «МАИ».

Иванов Николай Сергеевич — кандидат техн. наук, старший научный сотрудник кафедры «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» НИУ «МАИ», кандидатскую диссертацию защитил в 2014 г.

Шишов Дмитрий Михайлович — кандидат техн. наук, научный сотрудник кафедры «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» НИУ «МАИ», кандидатскую диссертацию защитил в 2014 г.

Шишов Иван Михайлович — студент НИУ «МАИ».

Ковалев Константин Львович — доктор техн. наук, заведующий кафедрой «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» НИУ «МАИ», докторскую диссертацию защитил в 2005 г.

Зубко Василий Васильевич — доктор техн. наук, ведущий научный сотрудник ОАО «Всероссийский НИИ кабельной промышленности», докторскую диссертацию защитил в 2017 г.

Elektrichestvo, 2019, No. 7, pp. 53–58

DOI:10.24160/0013-5380-2019-7-53-58

Fabrication and Testing of a High-Temperature Superconducting Coil for the Mockup Engine of an Unmanned Aerial Vehicle

ZANEGIN Sergeu Yu. (National Research University «Moscow Aviation Institute» — NRU «MAI», Moscow, Russia) — Graduate Student

IVANOV Nikolay S. (NRU «MAI», Moscow, Russia) — Senior Scientist, Cand. Sci. (Eng.)

SHISHOV Dmitriy M. (NRU «MAI», Moscow, Russia) — Scientist, Cand. Sci. (Eng.)

SHISHOV Ivan M. (NRU «MAI», Moscow, Russia) — Student

KOVALEV Konstantin L. (NRU «MAI», Moscow, Russia) — Head of the Department, Dr. Sci. (Eng.)

ZUBKO Vasilii V. (All-Russian Scientific Institute of the Cable Industry) — Senior Scientist, Dr. Sci. (Eng.)

The use of windings on the basis of high-temperature superconductivity (HTSC) in electrical machines makes it possible to make the machines more efficient due to an essentially higher permissible current load and to make them more compact and lighter, which opens the possibility of constructing fundamentally new systems. However, the operation of HTSC windings with alternating current has not been fully investigated as yet. In particular, the critical parameters of an HTSC coil and a short HTSC sample differ essentially from each other. In addition, during operation of the devices with alternating current, losses occur in them and, in particular, in the superconductor, the correct characteristics of which are necessary for designing the cryogenic system. The article describes the technological process of producing a racetrack type coil made of so-called second-generation (2G) HTSC tape and presents the results of its tests carried out at the liquid nitrogen temperature and with different values of the power supply voltage. Based on the obtained

experimental data, the losses in the HTSC coil operating with alternating current have been determined. The obtained study results were used in designing the electric motor for an unmanned aerial vehicle.

Key words: *high-temperature superconductivity, AC losses, HTSC coil test results, electric motor for unmanned aerial vehicle*

REFERENCES

1. **de Bruyn B.J., Jansen J.W., Lomonova E.A.** AC losses in HTS coils for high-frequency and non-sinusoidal currents. — *Supercond. Sci. Technol.*, 2017, vol. 30, No. 9.
2. **Zubko V., Fetisov S., Vysotsky V.** Hysteresis Losses Analysis in 2G HTS cables. — *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2016, vol. 26, No. 3.
3. **Ogawa J., Fukui S., Oka T., Sano Y., Ogawa M., Ranecky S.** Experimental Investigation of AC Loss Characteristics in HTS Tape With Rotating Magnetic Field. — *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2017, vol. 27, No. 4.
4. **Kazovskiy Ye.Ya., Kartsev V.P., Shakhtarin V.N.** Superconducting Sverkhprovodyashchiye magnitnye sistemy (magnetic systems). Leningrad, Nauka, 1967, 323 p.
5. **LOCTITE STYCAST** [Electron. resurs] https://www.henkel-adhesives.com/us/en/product/potting-compounds/loctite_stycast_2850ftbl.html (Data obrashcheniya 09.01.2019).
6. **LabVIEW** [Electron. resurs] <http://www.ni.com/ru-ru/shop/labview.html> (Data obrashcheniya 09.01.2019).
7. **Kovalev K.L., Verzhbitsky L.G., Kozub S.S., Penkin V.T., Larionov A.E., Modestov K.A., Ivanov N.S., Tulinov E.E., Dubensky A.A.** Brushless superconducting synchronous generator with claw-shaped poles and permanent magnets. — *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, iss. 3, April 2016, Article number 7405291, DOI: 10.1109/TASC.2016.2528995.
8. **Ye Yang, Shiyang Duan, Yi Ren, Yudong Jiang, Ling Feng, Xiao Zhang, Haibo Chai, Mingwei Kuang, Jiandong Wu, Xinheng Yang and Yong Zhao.** Design and Development of a Cryogen-free Superconducting Prototype Generator with YBCO Field Windings. DOI 10.1109/TASC.2016.2514349. — *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*.
9. **Magnusson N., Paulsen M., Eliassen J.C., Abrahamsen A.B., Hellesm S.M., Runde M., Nysveen A., Moslett L.E., Bjerkli J., King P.** Fabrication of a Scaled MgB₂ Racetrack Demonstrator Pole for a 10- MW Direct-Drive Wind Turbine Generator. — *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2018, vol. 28, iss. 4.
10. **Amperium[®] Copper Laminated Wire** [Электрон. ресурс] https://www.amsc.com/wp-content/uploads/CPRAMP8501_8502_DS_A4_0414_WEB.pdf (Data obrashcheniya 09.01.2019).
11. **Kovalev K.L., Ivanov N.S., Il'yasov R.I., Nekrasova Yu.Yu., Penkin V.T., Dezhin D.S., Zhuravlev S.V.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2018, No. 10, pp. 45–60.

[21.01.2019]