

Модель униполярного электродвигателя на основе высокотемпературных сверхпроводников

НАУМОВ А.В., ПОЛЯКОВ А.В., СУРИН М.И., ЩЕРБАКОВ В.И.

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Описана расчетная электромеханическая модель униполярного электродвигателя с магнитной системой на основе высокотемпературных сверхпроводников второго поколения. Униполярные электродвигатели с ротором в виде диска наиболее просты по исполнению магнитной системы и силовоточного контакта. Использование высокотемпературных сверхпроводников второго поколения (ВТСП-2) для создания постоянного магнитного поля в области ротора позволяет повысить плотность тока в обмотках и соответственно мощность двигателя. Возможность работы ВТСП при температуре жидкого азота (77 К) упрощает конструкцию криостата по сравнению с магнитными системами на основе низкотемпературных сверхпроводников. Для униполярных электродвигателей большой мощности наиболее перспективным представляется использование в их конструкции жидкометаллических контактов для подведения электрического тока к вращающемуся ротору. Преимуществом данного типа электродвигателей является линейная зависимость крутящего момента от тока в роторе. Выполнено численное моделирование работы электродвигателя под управлением пропорционально-интегрально-дифференцирующего (ПИД) регулятора с помощью компьютерной программы SciLab Xcos. Продемонстрировано использование расчетной модели для подбора оптимальных коэффициентов ПИД-регулятора. Выполнен анализ динамических режимов работы электродвигателя. Проведено сравнение результатов численного моделирования с полученными ранее экспериментальными данными.

К л ю ч е в ы е с л о в а: высокотемпературная сверхпроводимость, электродвижение, электродвигатель, униполярная электрическая машина

В рамках развития концепции электродвижения железнодорожного и морского транспорта с применением современных наноструктурированных материалов, таких как высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП), в НИЦ «Курчатовский институт» ведется разработка инновационного униполярного электродвигателя с магнитной системой постоянного поля на основе ВТСП второго поколения (ВТСП-2).

В отличие от современных многополюсных электродвигателей, в которых переменное магнитное поле создается с помощью коллектора или силовой электроники, принцип работы униполярного электродвигателя основан на действии силы Ампера, которая возникает в роторе двигателя при протекании по нему тока во внешнем постоянном магнитном поле. Рабочий ток ротора униполярного электродвигателя может достигать значений в несколько кА [1, 2, 3] при небольшом напряжении в единицы В. Это является преимуществом при использовании в качестве источника питания литий-ионных аккумуляторов. Учитывая небольшое рабочее напряжение, ячейки аккумуляторов можно соединять параллельно, что не требует электроники для балансировки напряжений.

Для создания магнитного поля в области ротора перспективно применять современные высокотемпературные сверхпроводящие проводники, работающие

при температурах жидкого азота, что позволяет создавать сильные магнитные поля и приводит к повышению мощности и снижению массогабаритных характеристик униполярного электродвигателя [2]. Одним из основных преимуществ данного типа электродвигателей является то, что зависимость крутящего момента на валу прямо пропорционально зависит от значения протекающего через ротор тока. Это позволяет упростить управляющую электронику и с добавлением обратной связи использовать электродвигатель в качестве сервопривода. Отсутствие у электродвигателя полюсов и переменных магнитных полей обеспечивает непрерывность движения и отсутствие биений крутящего момента, характерных для синхронных или асинхронных электродвигателей.

Возможными вариантами применения униполярных электродвигателей на основе ВТСП могут быть управляемые приводы исполнительных механизмов металлообрабатывающих станков, прокатных станов и прочих производственных механизмов.

Целью данной работы является создание расчетной электромеханической модели для униполярного двигателя с дисковым ротором для настройки коэффициентов ПИД-регулятора униполярного электродвигателя в качестве мощного сервопривода с обратной связью по частоте вращения.

Описание конструкции униполярного электродвигателя. Ротором создаваемого униполярного электродвигателя является медный диск как наиболее простой вариант с точки зрения конструкции магнитной системы и простоты ввода больших (до 1000 А) токов. Возможными вариантами исполнения также могут быть цилиндрический ротор и ротор в форме колокола [4].

На рис. 1 представлена конструкция униполярного электродвигателя со сверхпроводящей магнитной системой и дисковым ротором в разрезе.

Постоянное магнитное поле создается соленоидом из высокотемпературного сверхпроводника второго поколения. Современный ВТСП-2 представляет собой многослойные наноструктурированные оксидные покрытия на металлических лентах (рис. 2). ВТСП-соленоид состоит из 200 витков ВТСП-ленты сечением 4×0,1 мм.

Соленоид размещается в криостате с жидким азотом. Рабочая температура соленоида 77 К, но возможно и понижение температуры с целью повышения рабочего тока посредством откачки паров азота [6]. Криостат оснащен токовыми вводами, портом вакуумной откачки, штуцером заливки жидкого азота и штуцером сброса испарившегося газа, совмещенного с электрическим разъемом для вывода сигналов температуры и напряжения на ВТСП-соленоиде. Корпус электродвигателя является магнитопроводом, с помощью которого обеспечивается равномерное распределение магнитного поля в области ротора и экранирование окружения электродвигателя от рассеянных магнитных полей. Габаритный диаметр корпуса электродвигателя 400 мм.

Ротор представляет собой медный диск диаметром 240 мм и толщиной 4 мм. Из-за больших рабочих токов неизбежно использование в конструкции ротора жидкометаллических скользящих контактов. Чтобы исключить токсичные и химически активные металлы и сплавы, такие как ртуть или сплав натрия-калий (NaK) [1], в качестве проводника предлагается использовать эвтектический сплав галлий-индий-олово с температурой плавления 4,85 °С [5].

Электромеханическая модель. Для описания динамики электродвигателя и подбора коэффициентов ПИД-регулятора в среде моделирования *SciLab Xcos* реализована расчетная электромеханическая модель.

ВТСП-магнитная система в области ротора создает постоянное магнитное поле с индукцией 0,8 Тл. Магнитопровод электродвигателя изготавливается из электротехнической стали марки 10880 с высоким полем насыщения 1,81 Тл.

Расчет индукции магнитного поля выполнен в программе FEMM методом конечных разностей (рис. 3).

Крутящий момент на валу электродвигателя M линейно зависит от тока ротора I :

$$M = K_j I - M_f. \tag{1}$$

Численно интегрируя магнитное поле по радиусу ротора и учитывая, что ток в роторе равномерно растекается

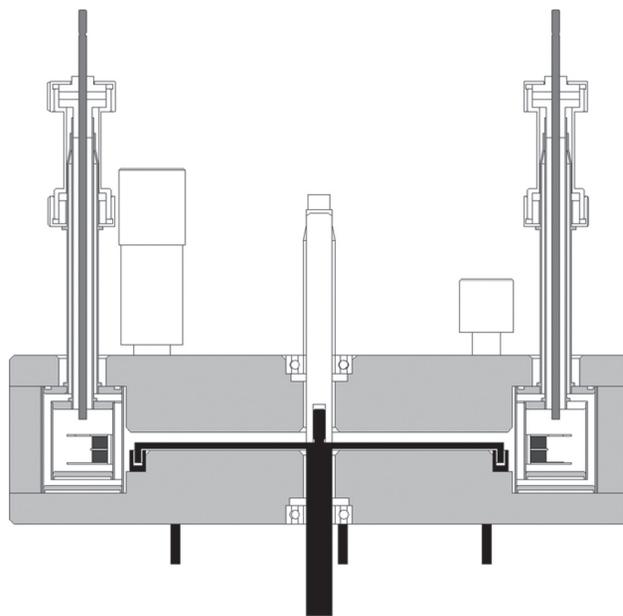


Рис. 1. Униполярный электродвигатель в разрезе

Fig. 1. Cross-section of homopolar electric motor

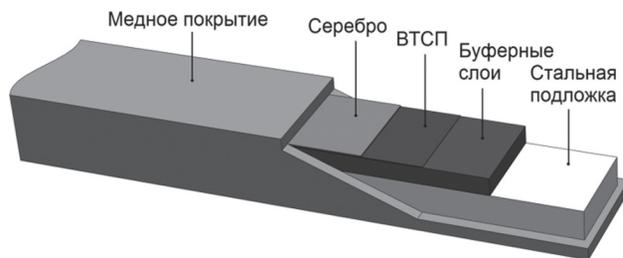


Рис. 2. Структура высокотемпературного сверхпроводника

Fig. 2. High temperature superconductor structure

от центра к периферии, коэффициент $K_j = 0,005 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{А}$. Также учтен приближенно стартовый момент статического трения $M_f = 0,01 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

Уравнение движения ротора приобретает следующий вид:

$$J_0 \frac{d\omega}{dt} = M - B\omega, \tag{2}$$

где ω – угловая скорость вращения ротора, рад/с; J_0 – момент инерции дискового ротора, кг·м² ($J_0 = 0,014 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$); B – коэффициент вязкого сопротивления, кг·м²/с.

Коэффициент B зависит от многих факторов, таких как сопротивление воздуха, трение подшипникового узла, вязкое сопротивление жидкометаллического контакта. Точное его значение целесообразно получить из эксперимента. В данной расчетной модели принято $B = 0,01 \text{ кг}\cdot\text{м}^2/\text{с}$.

Применяя преобразование Лапласа $\omega(t) \rightarrow \Omega(s)$ к формуле (2), передаточная функция от комплексной переменной s принимает следующий вид:

$$\Omega(s) = \frac{1}{J_0 s + B} M(s). \tag{3}$$

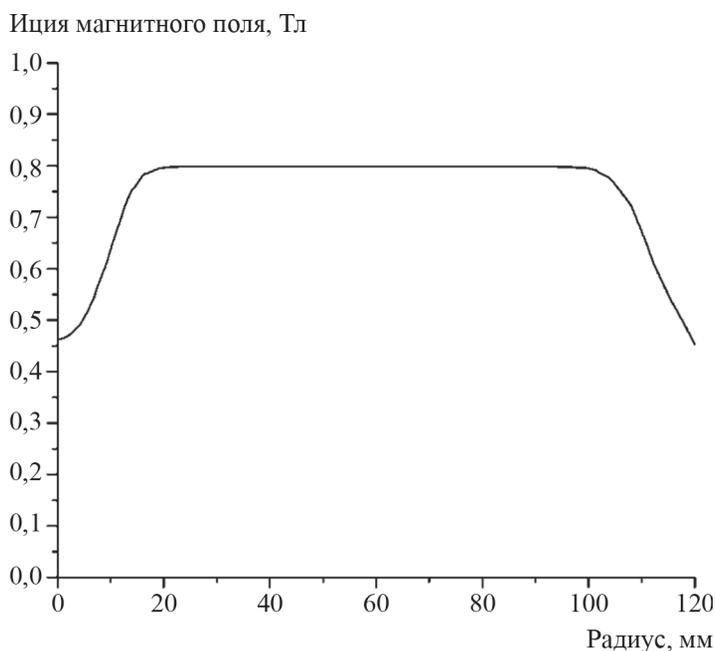


Рис. 3. Результат расчета индукции магнитного поля униполярного электродвигателя
Fig. 3. The result of calculating magnetic field induction of the homopolar electric motor

На рис. 4 представлена схема динамической модели униполярного электродвигателя, выполненная в программе *SciLab Xcos*.

В модели также учтены задержки при передаче команд от ПИД-регулятора к источнику питания.

Сравнивая расчетные и экспериментальные характеристики (рис. 5), можно в дальнейшем уточнить константу трения для реального прототипа униполярного электродвигателя. Максимальная механическая мощность электродвигателя при токе ротора 400 А составляет 380 Вт.

Для определения коэффициентов регулятора был выбран метод Зиглера–Никольса [7]. Первоначально

принимая интегральный и дифференциальный коэффициенты K_i и K_d равными нулю, производится подбор пропорционального коэффициента K_p , при котором система входит в режим незатухающих колебаний. Принимая данное значение за K_u , коэффициенты регулятора выставляются со значениями:

$$K_p = K_u/5; \quad K_i = 2/5K_u/T_u; \quad K_d = K_uT_u/15,$$

где T_u – период колебаний.

Результат настройки с данными параметрами показан на рис. 6, где пунктиром обозначена уставка по скорости вращения, черным – скорость вращения, а штрих-пунктиром – ток ротора.

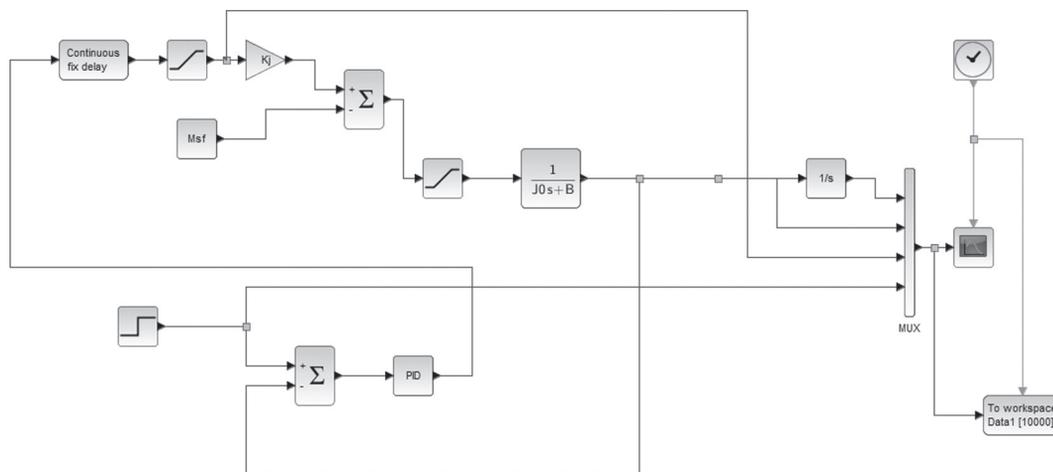


Рис. 4. Схема динамической модели униполярного двигателя
Fig. 4. Dynamic model scheme of the homopolar electric motor

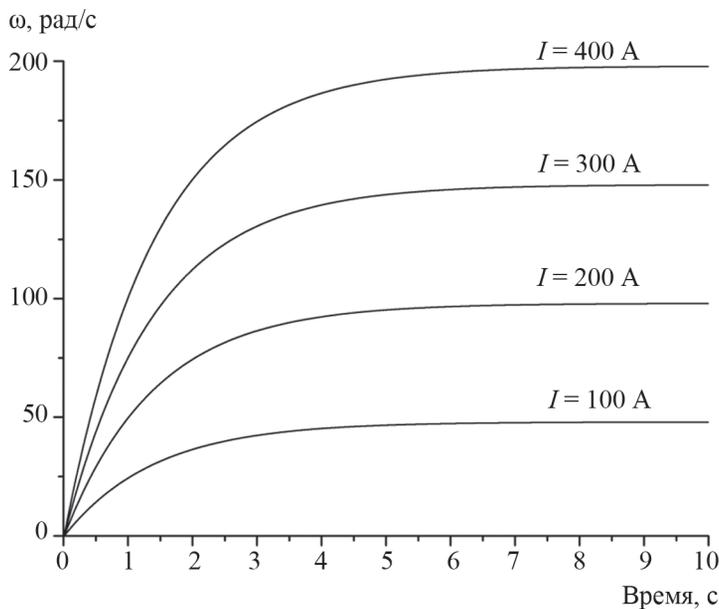


Рис. 5. Динамика разгона ротора при фиксированном токе
 Fig. 5. Rotor acceleration dynamics at a fixed current

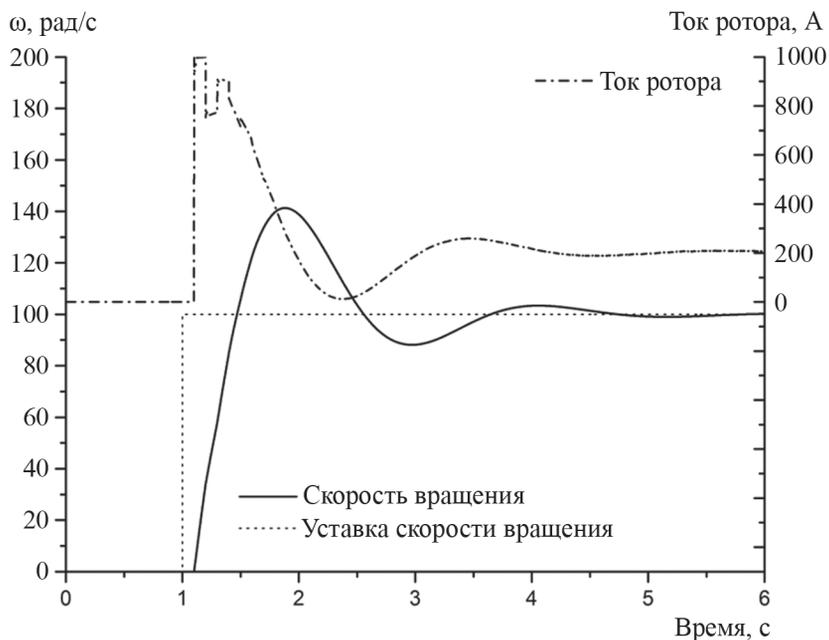


Рис. 6. Динамика работы ротора под управлением ПИД-регулятора
 Fig. 6. The dynamics of the rotor under the PID control

Выбег за пределы уставки обусловлен задержкой команды источнику питания и зависит от величины коэффициента K_i . Уменьшением данного коэффициента осуществляется полная настройка регулятора (рис. 7).

На рис. 8 представлены экспериментальные данные по работе регулятора на простой модели дискового униполярного электродвигателя на постоянных магнитах. Данные результаты изложены в [8].

Выводы. Для разрабатываемой конструкции униполярного электродвигателя с магнитной системой на

основе высокотемпературных сверхпроводников второго поколения рассчитаны основные параметры и создана расчетная электромеханическая модель. Успешно продемонстрированы возможности использования расчетной модели для настройки системы управления униполярным электродвигателем на основе ВТСП-2 и осуществлен подбор оптимальных значений коэффициентов ПИД-регулятора.

Работа выполняется при поддержке НИЦ «Курчатовский институт», приказ № 1057 от 02.07.2020.

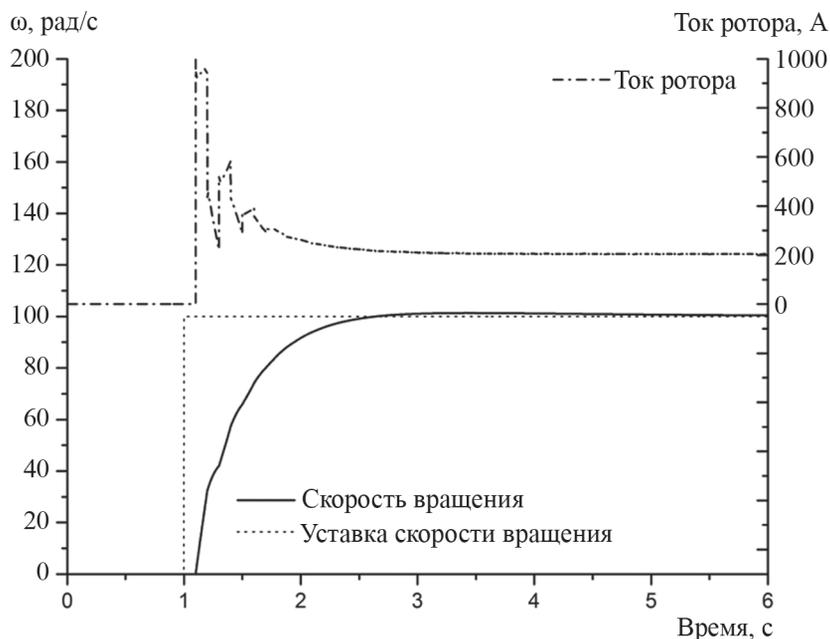


Рис. 7. Динамика работы ротора под управлением ПИД-регулятора

Fig. 7. The dynamics of the rotor under the PID control

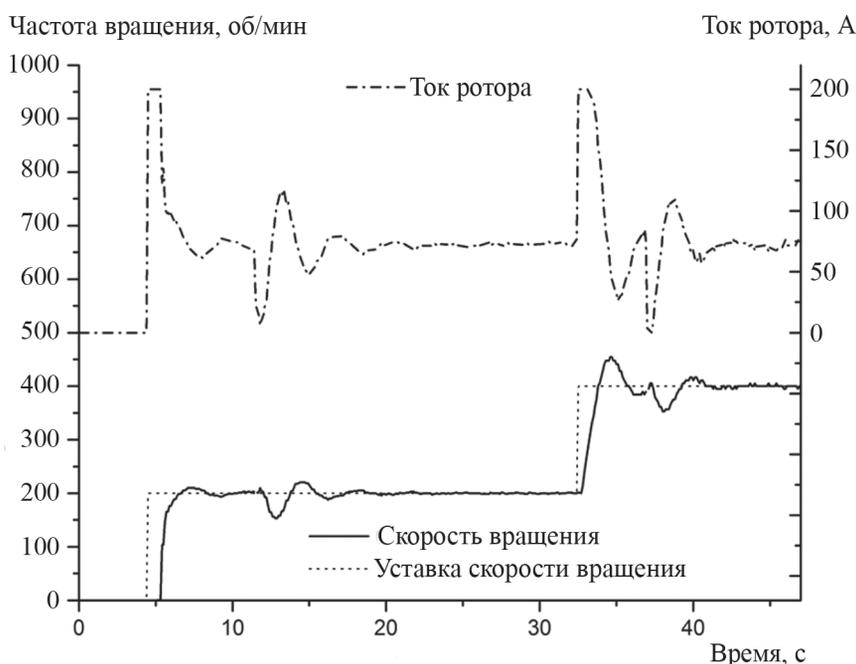


Рис. 8. Динамика работы уменьшенной модели униполярного электродвигателя с постоянными магнитами (экспериментальные данные)

Fig. 8. Dynamics of operation of a small model of a homopolar electric motor with permanent magnets (experimental data)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Thongam J., Tarbouchi M., Okou A., Bouchard D., Beguena-ne R.** Trends in naval ship propulsion drive motor technology. – 2013 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC), 2013. pp. 1–5, DOI: 10.1109/EPEC.2013.6802942.
 2. **Fuger R., Guina A., Sercombe D., Kells J., et al.** Superconducting motor developments at Guina Energy Technologies. – 2015 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD), 2015, pp. 362–363, DOI: 10.1109/ASEMD.2015.7453613.

3. **Thome R.J., Creedon W., Reed M., Bowles E., Schaubel K.** Homopolar motor technology development. – Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference, 2002, vol.1, pp. 260 – 264, DOI: 10.1109/PES.2002.1043229.
 4. **Суханов Л.А., Сафиуллина Р.Х., Бобков Ю.А.** Электрические униполярные машины. М.: ВНИИЭМ, 1964, 136 с.
 5. **Maribo D., Gavrilash M., Reilly P.J., Lynch W.A., Sondergaard N.A.** Comparison of Several Liquid Metal Sliding Electric Contacts. Electrical Contacts. – Proceedings of the Annual Holm Conference on Electrical Contacts, 2010, pp. 1–7, DOI: 10.1109/HOLM.2010.5619461.

6. Диев Д.Н., Лепехин В.М., Макаренко М.Н., Поляков А.В., и др. Криомагнитная система высокоградиентного магнитного сепаратора на основе высокотемпературных сверхпроводников второго поколения. – Ядерная физика и инжиниринг, 2018, т. 9, № 2, с. 130–140, DOI: 10.1134/S207956291802001X.

7. Ziegler J.G., Nichols N.B. Optimum Settings for Automatic Controllers. – Transactions of the ASME, 1942, vol. 64, pp. 759–768.

8. Наумов А.В., Поляков А.В., Сурин М.И., Щербаков В.И. Униполярный электродвигатель сервопривода с магнитной системой на основе высокотемпературных сверхпроводников. – Электричество, 2020, № 4, с. 52–55.

9. Evans P.D., Eastham J.F. Disc-geometry homopolar synchronous machine. – IEE Proceedings B (Electric Power Applications), 1980, vol. 127, No. 5, pp. 299–307, DOI: 10.1049/ip-b.1980.0039.

10. Lee S., Hong J., Kwon Y., Jo Y., Baik S. Study on Homopolar Superconductivity Synchronous Motors for Ship Propulsion Applications. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2008, vol. 18, No. 2, pp. 717–720, DOI: 10.1109/TASC.2008.921334.

11. Cho Y.H., Lee K.W., Kim Y.S., Park I.H. Analysis of Superconducting Homopolar Synchronous Motor using 3D inductance parameter. – 2009 International Conference on Electrical Machines and Systems, Tokyo, 2009, pp. 1–4, DOI: 10.1109/ICEMS.2009.5382657.

12. Schneeberger T., Nussbaumer T., Kolar J.W. Magnetically Levitated Homopolar Hollow-Shaft Motor. – IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2010, vol. 15, No. 1, pp. 97–107, DOI: 10.1109/TMECH.2009.2018836.

13. Lashkevich M., Anuchin A., Aliamkin D., Briz F. Control strategy for synchronous homopolar motor in traction applications. – 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Beijing, 2017, pp. 6607–6611, DOI: 10.1109/IECON.2017.8217153.

14. Lin F., Qu R., Li D., Xie K. Fully Superconducting Homopolar DC Machine. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2017, vol. 27, No. 4, DOI: 10.1109/TASC.2017.2677483.

15. Engel T.G., Kontras E.A. Modeling and Analysis of Homopolar Motors and Generators. – IEEE Transactions on Plasma Science, 2015, vol. 43, No. 5, pp. 1381–1386, DOI: 10.1109/TPS.2015.2405531.

[16.04.2021]



Авторы: **Наумов Андрей Викторович** – ведущий инженер отдела сверхпроводимости Курчатовского комплекса Нано-, Био-, Инфо-, Когно-, Социогуманитарных Природоподобных технологий (НБИКС-ПТ) Национального исследовательского центра (НИЦ) «Курчатовский институт».



Поляков Алексей Вячеславович – научный сотрудник отдела сверхпроводимости Курчатовского комплекса НБИКС-ПТ НИЦ «Курчатовский институт».



Сурин Михаил Израелевич – доктор техн. наук, заместитель начальника отдела сверхпроводимости Курчатовского комплекса НБИКС-ПТ НИЦ «Курчатовский институт».



Щербаков Владимир Игоревич – главный специалист отдела сверхпроводимости Курчатовского комплекса НБИКС-ПТ НИЦ «Курчатовский институт».

The Model of a Homopolar Electric Motor with High-Temperature Superconductors

NAUMOV Andrey V. (*Kurchatov Complex of NBICS Nature-Like Technologies of National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia*) – Leading Engineer of the Superconductivity Dept.

POLYAKOV Alexey V. (*Kurchatov Complex of NBICS Nature-Like Technologies of National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia*) – Research Scientist of the Superconductivity Dept.

SURIN Mikhail I. (*Kurchatov Complex of NBICS Nature-Like Technologies of National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia*) – Deputy Head of the Superconductivity Dept., Dr. Sci. (Eng.).

SHCHERBAKOV Vladimir I. (*Kurchatov Complex of NBICS Nature-Like Technologies of National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia*) – Head Specialist of the Superconductivity Dept.

The electromechanical model for analyzing a homopolar electric motor with a magnetic system made using second-generation high-temperature superconductors (HTSC 2G) is described. Homopolar electric motors made with a disk-shaped rotor have the simplest design of their magnetic system and heavy-current contact. Owing to the use of HTSC 2G conductors for producing constant magnetic field in the rotor area, it becomes possible to achieve a higher current density in the windings, thereby increasing the motor power capacity. Due to the HTSC ability to operate at the liquid nitrogen temperature (77 K), it becomes

possible to have a simpler cryostat design in comparison with magnetic systems based on low-temperature superconductors. For large-capacity homopolar motors, the use of liquid metal contacts for supplying current to the rotating rotor seems to be the most promising design solution. The advantage of motors of this type is that their torque depends linearly on the rotor current. The homopolar motor operation governed by a proportional-integral-differentiating (PID) controller was simulated using the SciLab Xcos software. The application of the analysis model for selecting the optimal PID-controller coefficients is demonstrated. The electric motor dynamic operation modes are analyzed. The numerical simulation results are compared with the previously obtained experimental data.

К е у в о р д с: high-temperature superconductivity, electric propulsion, electric motor, homopolar electric machine

REFERENCES

1. **Thongam J., Tarbouchi M., Okou A., Bouchard D., Begue-nane R.** Trends in naval ship propulsion drive motor technology. – 2013 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC), 2013. pp. 1–5, DOI: 10.1109/EPEC.2013.6802942.
2. **Fuger R., Guina A., Sercombe D., Kells J., et al.** Superconducting motor developments at Guina Energy Technologies. – 2015 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD), 2015, pp. 362–363, DOI: 10.1109/ASEMD.2015.7453613.
3. **Thome R.J., Creedon W., Reed M., Bowles E., Schaubel K.** Homopolar motor technology development. – Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference, 2002, vol. 1, pp. 260 – 264, DOI: 10.1109/PES.2002.1043229.
4. **Sukhanov L.A., Safiullina R.H., Bobkov U.A.** *Elektricheskie unipolyarnye mashiny* (Electric Unipolar Machines). M.: VNIEM, 1964, 136 p.
5. **Maribo D., Gavrilash M., Reilly P.J., Lynch W.A., Sondergard N.A.** Comparison of Several Liquid Metal Sliding Electric Contacts. Electrical Contacts. – Proceedings of the Annual Holm Conference on Electrical Contacts, 2010, pp. 1– 7, DOI: 10.1109/HOLM.2010.5619461.
6. **Diev D.N., Lepkhin V.M., Makarenko M.N., Polyakov A.V., et al.** *Yadernaya fizika i inzhiniring – in Russ.* (Nuclear Physics and Engineering), 2018, vol. 9, No. 2, pp. 130–140, DOI: 10.1134/S207956291802001X.
7. **Ziegler J.G., Nichols N.B.** Optimum Settings for Automatic Controllers. – Transactions of the ASME, 1942, vol. 64, pp. 759–768.
8. **Naumov A.V., Polyakov A.V., Surin M.I., Shcherbakov V.I.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2020, No. 4, pp. 52–55.
9. **Evans P.D., Eastham J.F.** Disc-geometry homopolar synchronous machine. – IEE Proceedings B (Electric Power Applications), 1980, vol. 127, No. 5, pp. 299–307, DOI: 10.1049/ip-b.1980.0039.
10. **Lee S., Hong J., Kwon Y., Jo Y., Baik S.** Study on Homopolar Superconductivity Synchronous Motors for Ship Propulsion Applications. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2008, vol. 18, No. 2, pp. 717–720, DOI: 10.1109/TASC.2008.921334.
11. **Cho Y.H., Lee K.W., Kim Y.S., Park I.H.** Analysis of Superconducting Homopolar Synchronous Motor using 3D inductance parameter. – 2009 International Conference on Electrical Machines and Systems, Tokyo, 2009, pp. 1–4, DOI: 10.1109/ICEMS.2009.5382657.
12. **Schneeberger T., Nussbaumer T., Kolar J.W.** Magnetically Levitated Homopolar Hollow-Shaft Motor. – IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2010, vol. 15, No. 1, pp. 97–107, DOI: 10.1109/TMECH.2009.2018836.
13. **Lashkevich M., Anuchin A., Aliamkin D., Briz F.** Control strategy for synchronous homopolar motor in traction applications. – 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Beijing, 2017, pp. 6607–6611, DOI: 10.1109/IECON.2017.8217153.
14. **Lin F., Qu R., Li D., Xie K.** Fully Superconducting Homopolar DC Machine. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2017, vol. 27, No. 4, DOI: 10.1109/TASC.2017.2677483.
15. **Engel T.G., Kontras E.A.** Modeling and Analysis of Homopolar Motors and Generators. – IEEE Transactions on Plasma Science, 2015, vol. 43, No. 5, pp. 1381–1386, DOI: 10.1109/TPS.2015.2405531.

[16.04.2021]