

Униполярный электродвигатель сервопривода с магнитной системой на основе высокотемпературных сверхпроводников

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

Предложена конструкция демонстрационного униполярного двигателя, магнитная система которого состоит из высокотемпературных сверхпроводников второго поколения, а дисковый ротор с жидкометаллическими токоъемными контактами – из сплава галлий-индий-олово. Для предлагаемой конструкции рассчитано магнитное поле и дана оценка крутящего момента. Рассмотрена возможность использования такого двигателя в качестве сервопривода. Приведены результаты экспериментов по управлению макетным униполярным двигателем на основе постоянных магнитов с помощью пропорционально-интегрально-дифференцирующего алгоритма.

К л ю ч е в ы е с л о в а: высокотемпературная сверхпроводимость, униполярный электродвигатель, сервопривод, жидкометаллический контакт

Принцип работы униполярного электродвигателя основан на действии силы Ампера, приложенной к диску или цилиндру с протекающим по нему током во внешнем постоянном магнитном поле [1]. Такой двигатель обладает рядом существенных преимуществ. Прямая пропорциональная зависимость крутящего момента от тока ротора позволяет значительно упростить электронную систему управления. Отсутствие у двигателя полюсов и переменных магнитных полей обеспечивает непрерывность движения и исключает биения крутящего момента. Такой двигатель может работать от автономных источников питания, например батарей, при больших значениях постоянного тока и малых значениях напряжения. Типичными являются токи в десятки килоампер и напряжения в единицы вольт [2–4]. Также стоит отметить, что небольшие значения напряжения питания позволяют соединять батареи параллельно, т.е. исключают необходимость в дополнительных электронных устройствах для балансировки ячеек.

Наиболее часто обсуждаемым в литературе вариантом использования униполярного двигателя является корабельная силовая установка. Такой вариант использования привлекателен по причине слабого шума, низких вибраций двигателя, а также легкой интеграции в сети постоянного тока [3]. Указанные преимущества позволяют предложить использование униполярных двигателей в качестве управляемых приводов исполнительных механизмов металлообрабатывающих станков, двигателей прокатных станов и других производственных механизмов.

Основными проблемами при создании униполярного двигателя являются необходимость переда-

чи больших значений токов через скользящий контакт к ротору и создание сильного постоянного магнитного поля в области ротора. Традиционные медно-графитовые щетки не могут обеспечить передачу токов в десятки килоампер к ротору, так как значительное превышение температуры приведет к их быстрому износу. Предлагается использовать жидкометаллический контакт на основе эвтектического сплава галлий-индий-олово [5]. Такое решение позволяет исключить использование токсичных и химически активных материалов, таких как ртуть и сплав натрия-калий (NaK) [1]. Применение современных высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) материалов позволяет создавать сильные магнитные поля, что повысит мощность и приведет к значительному улучшению массогабаритных характеристик униполярного двигателя [2].

Цель данной работы – разработка компактного демонстрационного униполярного электродвигателя с магнитной системой на основе ВТСП второго поколения для проработки технических решений при проектировании двигателей данного типа. Также экспериментально проверяются возможности применения униполярного двигателя в качестве мощного сервопривода с обратной связью по частоте вращения.

Конструкция униполярного двигателя. Униполярные двигатели делятся на три основных вида в зависимости от формы ротора: дискового, цилиндрического и в форме колокола [1]. Для создания демонстрационного униполярного двигателя был выбран первый тип как наиболее простой с точки зрения конструкции магнитной системы и выполнения жидкометаллического контакта; на оси рото-

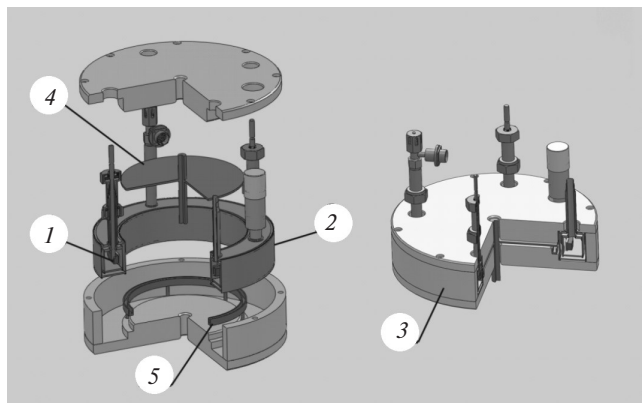


Рис. 1. Трехмерная модель униполярного двигателя

ра контакт в данной конфигурации получается максимально простым.

На рис. 1 представлены основные элементы конструкции демонстрационного униполярного двигателя со сверхпроводящей магнитной системой и дисковым ротором.

Постоянное магнитное поле создается соленоидом 1 из высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП), ВТСП соленоид состоит из 200 витков сверхпроводящей ленты второго поколения $4 \times 0,1$ мм. Требуемая длина проводника 179 м. Предполагаемый рабочий ток соленоида 50 А. Соленоид помещен в криостат 2, рассчитанный на работу с жидким азотом. Криостат оснащен необходимыми для работы токовыми вводами, портом вакуумной откачки, штуцером заливки жидкого азота и газосбросом, совмещенным с электрическим многоконтактным разъемом для диагностики температуры и напряжения на ВТСП соленоиде. Исходя из предыдущего опыта, возможно понижение температуры посредством откачки паров азота до 66 К с целью повышения рабочего тока ВТСП соленоида [6]. С помощью магнитопровода 3 обеспечивается равномерное распределение магнитного поля в области ротора и экранирование двигателя от рассеянных магнитных полей. Ротор 4 представ-

ляет собой медный диск диаметром 240 мм и толщиной 4 мм. Для пропускания через него тока предполагается использовать жидкометаллический контакт. Для снятия тока с внешней кромки ротора в конструкции предусмотрена неподвижная кольцевая канавка из меди 5, заполняемая жидким металлом. Габаритный диаметр корпуса 400 мм.

Для предлагаемой конструкции выполнен расчет индукции магнитного поля методом конечных разностей в программе FEMM (рис. 2).

Магнитной системой ВТСП в области ротора будет создаваться постоянное магнитное поле с индукцией 0,8 Тл. Магнитопровод предполагается изготавливать из электротехнической стали с высоким значением поля насыщения – примерно 2 Тл и более. При максимальном токе ротора 1000 А крутящий момент двигателя составляет 5 Н·м.

Эксперимент. Макетная модель униполярного двигателя. Для проведения экспериментов по управлению униполярным двигателем создана макетная модель на основе постоянного магнита (рис. 3). Она представляет собой медный диск на медной оси, размещенный между полюсами постоянного магнита с индукцией 0,1 Тл. Ось диска вставлена в медный стакан, заполненный эвтектическим сплавом галлий-индий-олово (Ga 62%, In 25%, Sn 13%) с температурой плавления 4,85 °С. Токосъем с периферии диска осуществляется с помощью четырех щеток типа МГ-4. Для считывания данных о частоте вращения применялся инкрементальный энкодер. Ток ротора поступал от источника TDK Lambda GEN500, его максимум был ограничен значением 200 А. Оцифровка сигнала энкодера проводилась модульной измерительной системой. Расчет частоты вращения ротора, управление источником тока и ПИД-алгоритм осуществлялись на персональном компьютере программой, написанной на языке LabVIEW.

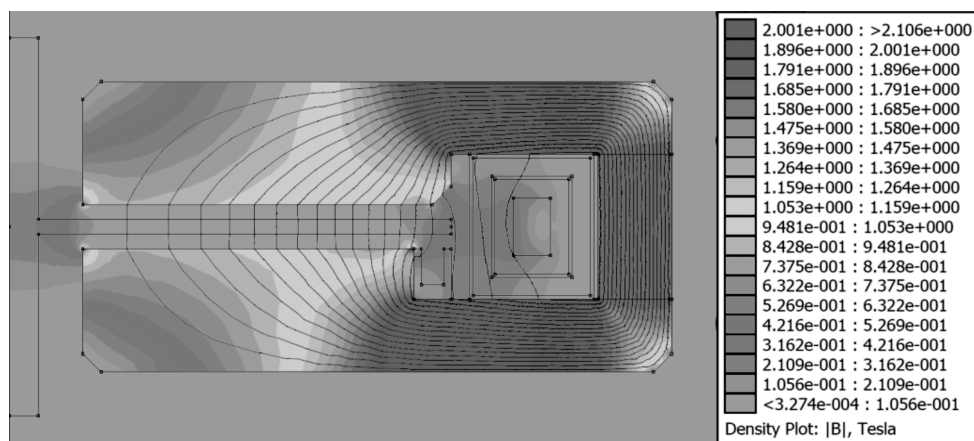


Рис. 2. Расчет индукции магнитного поля униполярного двигателя



Рис. 3. Макетная модель униполярного двигателя

Результаты. Проверена работа макетной модели под управлением ПИД-регулятора. Параметры регулятора настраивались методом Зиглера–Никольса [7]. Подбором пропорциональной составляющей регулятора были получены устойчивые колебания с частотой 1 Гц, связанные с перерегулированием (рис. 4).

Работа настроенного регулятора продемонстрирована на рис. 5. Скорости набора частоты вращения ограничены максимальным значением тока. Скорость сброса обусловлена силой трения, так как в данной конструкции не предусмотрены перемена полярности и активное торможение.

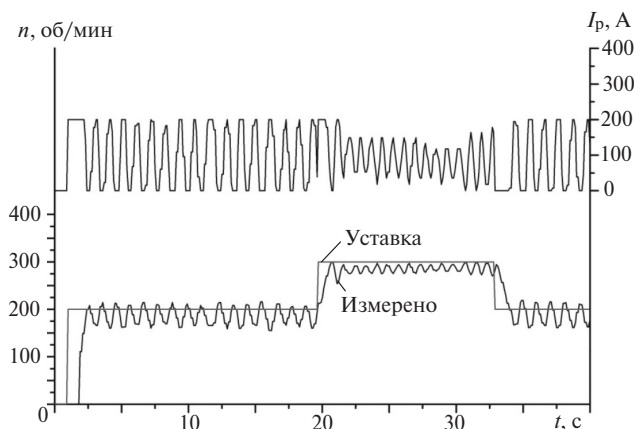


Рис. 4. Работа ненастроенного ПИД-регулятора

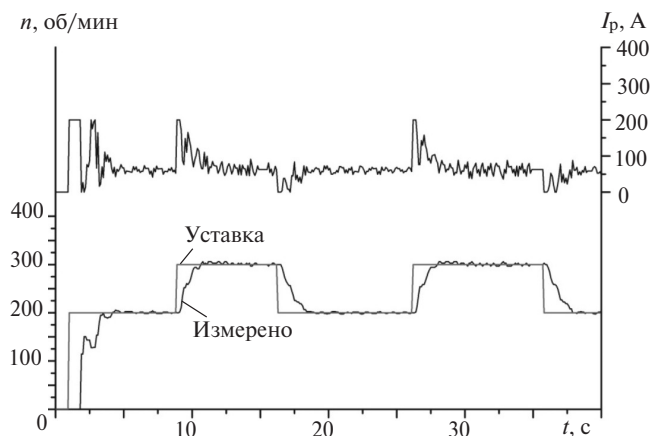


Рис. 5. Работа настроенного ПИД-регулятора

Выводы. 1. В рассмотренной в статье макетной модели униполярного двигателя на основе постоянных магнитов для подведения тока к ротору использовались как медно-графитовые щетки МГ-4, так и жидкометаллический контакт на основе эвтектического сплава галлий-индий-олово. По сравнению со щетками контакт на жидком металле показал практически полное отсутствие нагрева при протекании тока и малое трение. Планируется замена щеток в макетной модели на жидкометаллический контакт с целью отработки технологии и ее применения в демонстрационном двигателе на ВТСП.

2. Эксперименты по работе модельного двигателя под управлением ПИД-алгоритма успешно продемонстрировали возможности управления униполярным двигателем и его использование в качестве сервопривода с обратной связью по частоте вращения.

Работа выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский институт», приказ № 1361 от 25 июня 2019.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Суханов Л.А., Сафиуллина Р.Х., Бобков Ю.А. Электрические униполярные машины. М.: ВНИИЭМ, 1964.
2. Thome R.J., Creedon W., Reed M., Bowles E., Schaubel K. Homopolar motor technology development. — Proc. of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Confvol.1, 260–264. DOI: 10.1109/PSS.2002.1043229.
3. Thongam Jogendra, Tarbouchi Mohammed, Okou A., Bouchard D., Beguenane Rachid. Trends in naval ship propulsion drive motor technology. — IEEE Electrical Power and Energy Conf., EPEC 2013. 1–5. DOI: 10.1109/EPEC.2013.6802942.
4. Fuger Rene, Guina Ante, Sercombe David, Kells John, Matsekh Arkadiy, Labes Kurt, Lissington Tony, Fabian Cesimiro, Chu Grace. Superconducting motor developments at Guina Energy Technologies. 362–363. DOI: 10.1109/ASEMD.2015.7453613.
5. Maribo D., Gavrilash M., Reilly P.J., Lynch W.A., Sondergaard N.A. Comparison of Several Liquid Metal Sliding Electric Contacts. Electrical Contacts. — Proc. of the Annual Holm Conf. on Electrical Contacts. 1–7. DOI: 10.1109/HOLM.2010.5619461.
6. Диев Д.Н., Лепехин В.М., Макаренко М.Н., Поляков А.В., Сурин М.И., Шугова Д.И., Щербаков В.И. 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. and Nichols N.B. Optimum Settings for Automatic Controllers. Transactions of the ASME, 64, 759–768.

[27.02.2020]

А в т о р ы: Наумов Андрей Викторович — ведущий инженер НИЦ «Курчатовский институт».

Поляков Алексей Вячеславович — младший научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт».

Сурин Михаил Израелевич — доктор техн. наук, заместитель начальника отдела сверхпроводимости НИЦ «Курчатовский институт», диссертацию защитил в 2009 г.

Щербаков Владимир Игоревич — главный специалист НИЦ «Курчатовский институт».

Homopolar Servomotor with a High Temperature Superconducting Magnetic System

NAUMOV Andrey V. (National Research Centre «Kurchatov Institute», Moscow, Russia) – Leading Engineer

POLYAKOV Alexey V. (National Research Centre «Kurchatov Institute», Moscow, Russia) – Junior Scientist

SURIN Mikhail I. (National Research Centre «Kurchatov Institute», Moscow, Russia) – Deputy Head of Dept. of Superconductivity, Dr. Sci. (Eng.)

SHCHERBAKOV Vladimir I. (National Research Centre «Kurchatov Institute», Moscow, Russia) –Senior Specialist

In this work the design of a homopolar motor prototype is proposed. The magnetic system consists of a high temperature superconducting (HTS) stator and a disc rotor with liquid metal sliding electric contacts made of gallium indium tin alloy. The estimation of magnetic fields and torques is performed for the device. The possibility of using this motor as a servo actuator is considered. The results of the preliminary experimental attempts to control a single-pole motor based on permanent magnets by means of a proportional–integral–derivative (PID) algorithm are presented.

Key words: *high temperature superconductors, homopolar motor, servomotor, liquid metal sliding electric contacts*

REFERENCES

1. **Sukhanov L.A., Safullina R.Kh., Bobkov Yu.A.** *Elektricheskiye unipolyarnye mashiny* (Electric unipolar machines). Moscow, VNIIEEM, 1964.

2. **Thome R.J., Creedon W., Reed M., Bowles E., Schaubel K.** Homopolar motor technology development. – Proc. of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conf. Vol.1260 –264. DOI: 10.1109/PESS.2002.1043229.

3. **Thongam Jogendra, Tarbouchi Mohammed, Okou A., Bouchard D., Beguenane Rachid.** Trends in naval ship propulsion drive motor technology. – IEEE Electrical Power and Energy Conf., EPEC 2013. 1–5. DOI: 10.1109/EPEC.2013.6802942.

4. **Fuger Rene, Guina Ante, Sercombe David, Kells John, Matsekh Arkadiy, Labes Kurt, Lissington Tony, Fabian Cesimiro, Chu**

Grace. Superconducting motor developments at Guina Energy Technologies. 362–363. DOI: 10.1109/ASEMD.2015.7453613.

5. **Maribo D., Gavrilash M., Reilly P.J., Lynch W.A., Sondergaard N.A.** Comparison of Several Liquid Metal Sliding Electric Contacts. Electrical Contacts. – Proc. of the Annual Holm Conf. on Electrical Contacts. 1–7. DOI: 10.1109/HOLM.2010.5619461.

6. **Diyev D.N., Lepkhin V.M., Makarenko M.N., Polyakov A.V., Surin M.I., Shutova D.I., Shcherbakov V.I.** Yadernaya fizika i inzhiniring – in Russ, 2018, vol. 9, №. 2, pp. 130–140. DOI: 10.1134/S207956291802001X.

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

[27.02.2020]