

Схема питания высокотемпературных сверхпроводниковых катушек бесконтактным способом

КОЛЕСОВ К.А., ДЕЖИН Д.С., ЛАРИОНОВ А.Е.

Основной проблемой при проектировании и эксплуатации электрических машин со сверхпроводниковой (СП) обмоткой возбуждения на роторе является передача энергии со статора на ротор с помощью щеточного узла. Для решения этой задачи был предложен метод бесконтактного питания СП катушек на роторе. Он заключается в использовании кольцевого трансформатора с воздушным зазором и полупроводникового выпрямителя, расположенного на роторе. В статье представлены результаты экспериментального исследования диода, охлаждаемого жидким азотом, и результаты численного моделирования схемы питания.

К л ю ч е в ы е с л о в а: электрические машины, сверхпроводниковая обмотка возбуждения, бесконтактное питание, вольт-амперная характеристика

Питание сверхпроводниковых катушек постоянным током. Сверхпроводящее электрооборудование позволит значительно увеличить электрические и магнитные нагрузки в элементах различных устройств и, как следствие, сократить их размеры. В сверхпроводящем проводе допустима плотность тока, в десятки раз превышающая таковую в обычных медных проводах сопоставимого сечения. Значения магнитных полей, получаемых с помощью сверхпроводников (СП), уже сейчас достигают 18 Тл. По сравнению со значениями 0,8–1,0 Тл в магнитном зазоре традиционных электрических машин (ЭМ) индукция в несколько тесла позволила бы перейти к «безжелезным» конструкциям генераторов и двигателей, значительно повысив их удельную мощность. Если учесть, что размеры электротехнических устройств обратно пропорциональны произведению допустимой плотности тока на индукцию магнитного поля, становится ясно, что применение сверхпроводников уменьшит размеры и массу электрооборудования в несколько раз. Создание криогенных электрических машин – естественное следствие научно-технического прогресса. Есть все основания утверждать, что к концу века сверхпроводниковые турбогенераторы мощностью более 1000 МВт будут работать в энергосистемах [1].

Одной из главных проблем вращающихся электрических машин является передача энергии со статора на ротор.

Большие значения токов питания обмотки возбуждения создают проблемы подвода энергии к ротору. При использовании высокотемпературных сверхпроводниковых (ВТСП) лент напряжение на обмотке возбуждения составляет доли вольт и мощность, потребляемая обмоткой возбуждения с учетом резистивности ВТСП провода и сопротивления спаев и коммутационных проводников, не-

велика – десятки ватт. При этом значение тока, создающего магнитное поле возбуждения, может составлять от десятков до сотен ампер [4]. Предельное значение тока возбуждения в ЭМ ограничено критическим значением тока в сверхпроводнике при текущей криогенной температуре и индукцией магнитного поля в области катушки.

Известны способы передачи энергии к вращающимся частям электрической машины. К ним относятся:

- контактные с помощью щеток и колец:
 - передача полного постоянного тока ротора;
 - передача переменного тока повышенного напряжения с использованием вращающегося трансформатора и вращающегося выпрямителя;
 - передача постоянного тока повышенного напряжения с использованием вращающегося понижающего полупроводникового преобразователя;
- бесконтактные:
 - вращающийся кольцевой трансформатор;
 - обращенный синхронный генератор с якорем на роторе, в котором постоянное напряжение получается с помощью вращающегося выпрямителя.

Контактный способ передачи полного тока питания через щетки представляется самым простым, однако ему присущи существенные недостатки:

- нестабильное сопротивление контакта;
- большое падение напряжения в зоне контакта, приводящее к значительным потерям;
- нестабильная работа щеточно-контактного узла (ЩКУ) в криогенной среде;
- возможное заиндевание и ухудшение коммутационных свойств при повышении влажности;
- необходимость частого обслуживания.

Уменьшения потерь в щетках можно добиться снижением тока через них при повышенном напряжении. При передаче переменного тока можно

использовать понижающий трансформатор и выпрямитель.

Для работы с постоянным током повышенного напряжения необходим понижающий полупроводниковый преобразователь, установленный на роторе. Такая схема пока не рассматривалась в литературе.

Питание обмотки ротора представляет собой сложную задачу. Большие значения тока питания (десятки и сотни ампер), малые значения напряжения в установившемся режиме (десятки милливольт), нелинейная ВАХ – все это предъявляет жесткие и противоречивые требования к источнику питания обмотки.

С точки зрения обеспечения необходимой МДС возбуждения электрической машины требуется источник стабильного тока. Однако большинство известных из них являются источниками напряжения – постоянного или переменного. Согласовать источник малого напряжения с нагрузкой при нелинейной ВАХ довольно сложно.

Самым простым решением является применение источника напряжения с внутренним сопротивлением, согласованным с ВАХ обмотки. Оно включает как естественные сопротивления (обмоток, влияния реакции якоря, насыщения магнитной цепи и т.д.), так и дополнительные резисторы в цепи питания. Причем суммарное сопротивление определяет значение постоянной времени питания обмотки ротора. Главный недостаток такого способа питания – большие потери в цепи питания, растущие с увеличением напряжения источника.

Применяемые источники могут быть как постоянного напряжения, так и переменного с выпрямителем. Более подходящим может оказаться электронный преобразователь, работающий в ключевом режиме и имеющий прямоугольную внешнюю характеристику. В начале подачи тока в обмотку он работает как источник напряжения, обеспечивая необходимую скорость подачи тока, а затем переходит в режим стабилизации заданного значения тока. Кроме того, такой преобразователь может быть понижающим уровень напряжения, если питание на ротор передается через щетки. В этом случае та же мощность будет передаваться при малых значениях тока, что позволит уменьшить размеры и массу щеточного узла.

Одним из главных недостатков в конструкции электрических машин со сверхпроводниковой обмоткой возбуждения на роторе является наличие щеточно-контактного узла. Он необходим для питания СП катушек постоянным током и регулирования его в процессе работы машины. Такая конструкция хороша для синхронных и асинхронных машин традиционного исполнения, но совершенно не подходит для питания обмотки возбуждения криогенных электрических машин. Поскольку ротор внутри машины находится, как правило, в

криогенной среде (например, в жидком азоте) возникает главная проблема: покрытие инеем щеток, контактных колец и самого узла целиком (рис. 1). Это приводит к возрастанию переходного сопротивления, образованию влаги на токоведущих частях, ухудшению условий коммутации и токопередачи, повышению вероятности аварии. Поэтому приходится размещать щеточный узел не внутри, а снаружи машины, вне криогенной зоны. Такой подход не решает проблему целиком, так как приводит к увеличению габаритных размеров ЭМ и усложняет её конструкцию. В ряде случаев для СП ЭМ это является существенным недостатком [2].

Для передачи тока к СП обмотке возбуждения на роторе предлагается метод бесконтактного питания. Его суть заключается в использовании кольцевого трансформатора с воздушным зазором и вращающегося выпрямителя (см. рис. 2 и 3). На первичную обмотку трансформатора, расположенную на статоре, подается переменный ток. К вторичной обмотке через полупроводниковый выпрямитель подключаются СП катушки обмотки возбуждения. Все они расположены на роторе ЭМ и способны выполнять свои функции в криогенной среде. Ток в СП обмотке регулируется посредством изменения тока в первичной обмотке вращающегося трансформатора. При такой схеме питания пропадает необходимость размещать щеточный узел вне криогенной зоны СП ЭМ. Как следствие, исчезают присущие ему отрицательные факторы, негативно влияющие на работу СП электрической машины [2].

Эксперимент с диодом. Для реализации предложенной схемы питания необходимо было подобрать компоненты, способные не только работать в криогенной среде жидкого азота, но длительно и качественно выполнять свои функции без потери основных свойств.

Для проведения первичного эксперимента был выбран диод марки Semikron SKR47FT/0219 и раз-

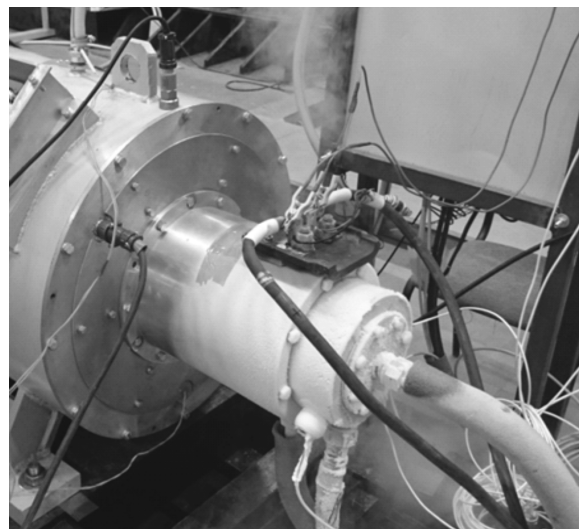


Рис. 1. Пример заиндевления щеточно-контактного узла в сверхпроводниковой электрической машине

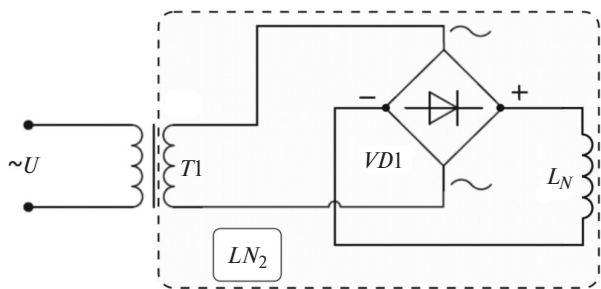


Рис. 2. Схема питания сверхпроводниковых катушек бесконтактным способом

работан алгоритм проведения эксперимента (рис. 4):

проверка целостности полупроводникового диода в среде жидкого азота (отсутствие трещин, разрушения поверхности);

проверка работы диода во включенном состоянии, а именно, его способность пропускать электрический ток;

измерение вольт-амперной характеристики диода и ее анализ.

Эксперимент состоял из двух частей. Вначале для снятия ВАХ диод был помещен в среду жидкого азота (77 К). От источника на него подавался постоянный ток и измерялось падение напряжения на диоде и подводящей линии.

Затем была снята ВАХ диода при температуре 300 К. По результатам обоих экспериментов были построены вольт-амперные характеристики (рис. 5).

Из рисунка видно, что падение напряжения на диоде при 77 К оказалось больше, чем при 300 К примерно на 30%.

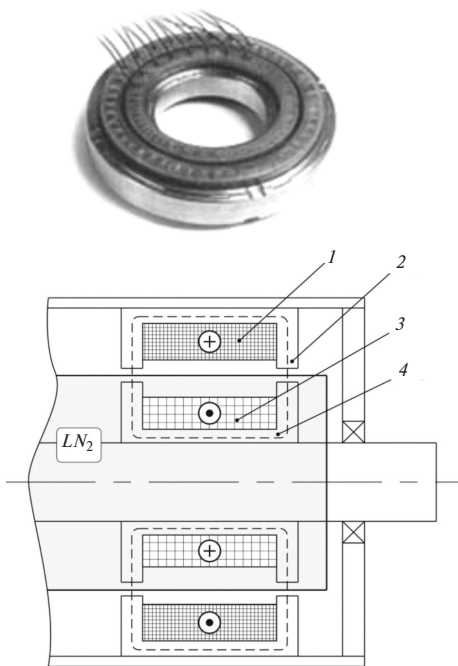


Рис. 3. Кольцевой вращающийся трансформатор: 1 – первичная обмотка трансформатора; 2 – магнитопровод статора; 3 – вторичная обмотка трансформатора; 4 – магнитопровод ротора



Рис. 4. Диод Semikron SKR47FT/021 в процессе эксперимента

С учетом полученной ВАХ диода при $T=77\text{K}$ была скорректирована параметрическая модель полупроводникового диода для дальнейшего численного моделирования схемы питания.

Численное моделирование схемы бесконтактного питания. В программе MATLAB Simulink была собрана схема питания, изображенная на рис. 6. Она включала в себя: источник переменного напряжения (200 В, 50 Гц), который подключался к первичной обмотке трансформатора; сам трансформатор; диодный мост и индуктивный элемент, который имитирует СП обмотку возбуждения. Поскольку используемый кольцевой трансформатор с воздушным зазором отличается от классического трансформатора, для него заранее, методом конечных элементов, были определены значения индуктивности обмоток. Они составили для первичной и вторичной обмоток $L_1=89,5\text{ мГн}$, $L_2=0,651\text{ мГн}$

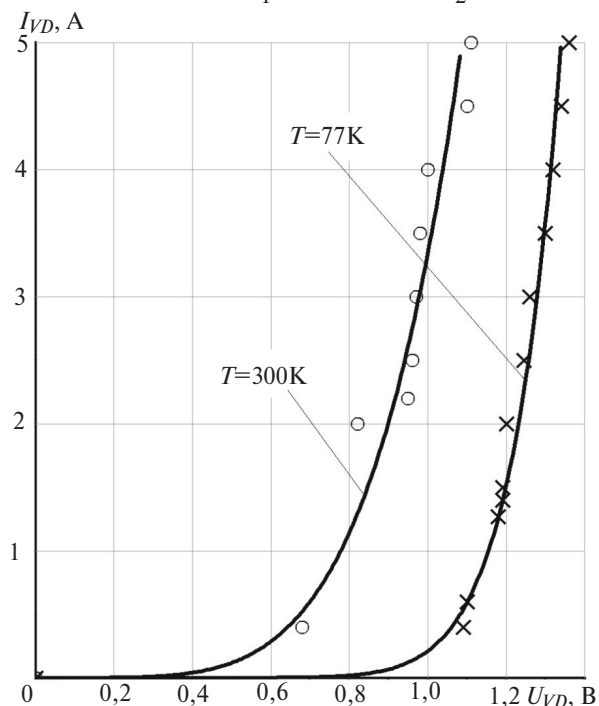


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики диода, полученные при разных температурах

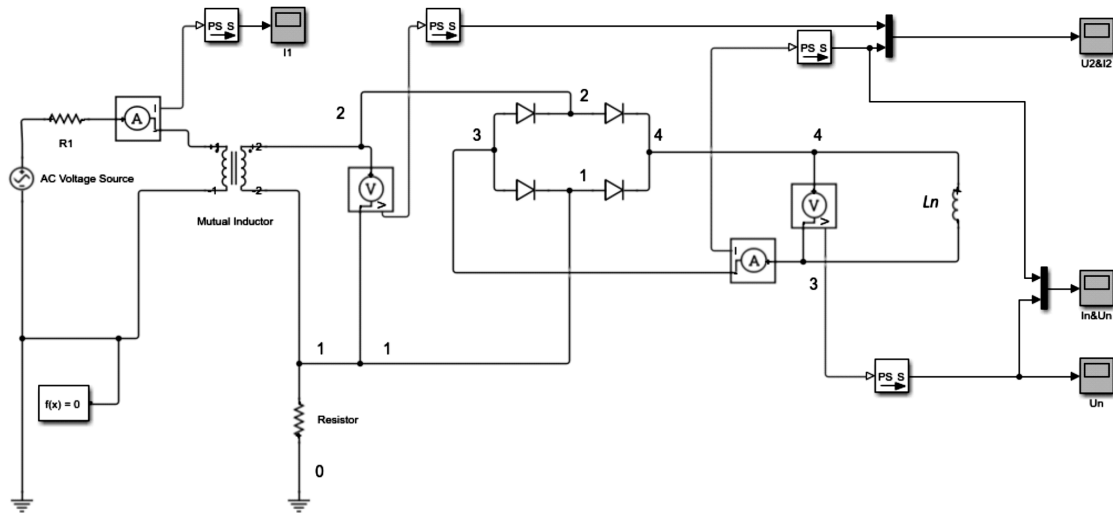


Рис. 6. Схема для численного моделирования в среде MATLAB Simulink Simscape

при взаимной индуктивности $M_{12} = 5,8$ мГн. К вторичной обмотке трансформатора подключался диодный мост двухполупериодной схемы выпрямления, к его выходному каскаду — нагрузочная индуктивность с параметрами $L_n = 50$ мГн, $R_n = 10^{-6}$ Ом. Такие значения соответствуют реальной катушке возбуждения, изготовленной для СП электродвигателя 200 кВт [4]. Для диодов, входящих в выпрямительный мост, были взяты параметры, полученные экспериментально при $T = 77$ К: прямое напряжение 1,3 В, сопротивление протекающему току при включении 0,3 Ом.

В результате моделирования были получены графики выпрямленного тока и переменного напряжения на вторичной обмотке трансформатора (см. рис. 7).

Как можно видеть, на рис. 7 форма тока содержит пульсации с амплитудой менее 1 А. Такая большая амплитуда связана с тем, что расчет проводился для отдельной катушки возбуждения. Реальный индуктор двигателя имеет значительно большую индуктивность (около 1 Гн), и амплитуда пульсаций может составлять несколько миллиампер. Общая форма изменения тока в процессе вво-

да носит аperiodический характер, который наблюдался при испытаниях 200 кВт ВТСП электродвигателя [4].

Заключение. В статье предложена схема бесконтактного питания ВТСП обмотки на основе кольцевого вращающегося трансформатора и полупроводникового выпрямителя, работающего при криогенных температурах. В результате экспериментальных исследований была получена вольт-амперная характеристика диода в среде жидкого азота. Сопоставление ВАХ при $T = 77$ и 300 К показало, что падение напряжения на диоде при криогенной температуре оказалось больше примерно на 30 %. Измеренная ВАХ позволила скорректировать параметры диода в расчетной модели для повышения точности численного моделирования схемы бесконтактного питания. Результаты расчета показали возможность использования предложенной системы питания ротора для перспективных электрических машин с ВТСП катушками возбуждения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-19-01269).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колесов К.А., Дежин Д.С. Бесконтактная система питания сверхпроводниковых катушек постоянного тока. — Тезисы 16-й Международ. конф. «Авиация и космонавтика-2017», 20–24 ноября 2017 г. Москва: Типография «Люксор», 2017, с. 163.
2. Колесов К.А., Дежин Д.С. Моделирование работы электрической схемы и вращающегося трансформатора для бесконтактной системы питания сверхпроводниковых катушек. Авиация и космонавтика-2018. Тезисы 17-й Международ. конф., 2018, с. 170–171.
3. Дежин Д.С., Иванов Н.С., Кобзева И.Н., Ковалев К.Л. Полностью сверхпроводниковая электрическая машина с высокой удельной мощностью. — Электротехника, 2018, № 2, с. 2–7.
4. Dezhin D.S., Kovalev K.L., Verzhbitskiy L.G., Kozub S.S., Firsov V.P. Design and Testing of 200 kW Synchronous Motor with 2G HTS Field Coils. — IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. (EES): Proceedings of Intern. Conf. on Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering-2017, Russia, No. 87 (2017), pp. 1 – 7.

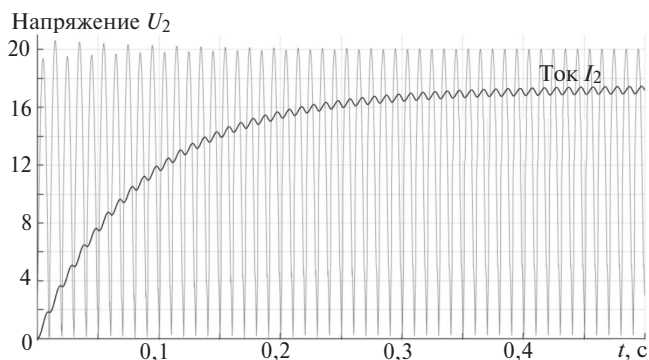


Рис. 7. График зависимости тока и напряжения на вторичной обмотке от времени

5. Ковалев Л.К., Ковалев К.Л., Конеев С.М.-А., Пенкин В.Т., Полтавец В.Н., Ильясов Р.И., Дежин Д.С. Электрические машины и устройства на основе массивных высокотемпературных сверхпроводников. М.: Физматлит, 2010, 369 с.

6. Пенкин В.Т., Ковалев К.Л. Синхронные электрические машины с композитными и объемными сверхпроводниками в роторе для транспортных систем. М.: НИУ «Московский авиационный институт», 2018, 216 с.

7. Дубенский Г.А., Модестов К.А., Кован Ю.И., Ковалев К.Л., Ларионов А.Е. Проблемы криогенного охлаждения полупроводниковых вентилях статических преобразователей. — Электричество, 2019, № 6, с. 4–12.

[02.10.2019]

А в т о р ы: Колесов Кирилл Алексеевич — выпускник магистратуры кафедры «Технология приборостроения» НИУ «Московский авиационный институт» — НИУ «МАИ».

Дежин Дмитрий Сергеевич — кандидат техн. наук, доцент, старший научный сотрудник НИУ «МАИ», диссертацию защитил в 2008 г.

Ларионов Анатолий Евгеньевич — кандидат техн. наук, доцент НИУ «МАИ», диссертацию защитил в 1995 г.

Electrichestvo, 2020, No. 1, pp. 20–24

DOI:10.24160/0013-5380-2020-1-20-24

The Contactless Power Supply Circuit of High-Temperature Superconducting Coils

KOLESOV Kirill A. (National Research University, «Moscow Aviation Institute» — NRU «MAI», Moscow, Russia) — Undergraduate of Instrumentation Technology Dept.

DEZHIN Dmitry S. (NRU «MAI», Moscow, Russia) — Associate Professor, Senior Scientist, Cand. Sci. (Eng.)

LARIONOV Anatoly Ye. (NRU «MAI», Moscow, Russia) — Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

The main problem in the design and operation of electric machines with a superconducting excitation winding on the rotor is the energy transfer from stator by brush unit. To solve the problem, a method of contactless power supply of the coils on the rotor was proposed. It consists in using a ring transformer with air gap and a rectifier on the cryogenic rotor. The results of the experiment with the diode cooled by LN₂ and the simulation of the power supply circuit are presented.

К е у w o r d s: electrical machines, superconducting field winding, contactless power, current-voltage characteristics

REFERENCES

1. Kolesov K.A., Dezhin D.S. *Beskontaktnaya sistema pitaniya sverkhprovodnikovykh katushek postoyannogo toka. Tezisy 16-i Mezhdunarod. konf. «Aviatsiya i kosmonavtika-2017»* (A contactless DC power supply system for superconducting coils, in Proceedings of the 16th International Conference «Aviation and Astronautics-2017», Moscow, 20–24 November 2017, Tipografiya «Lyukсор», 2017, p. 163.

2. Kolesov K.A., Dezhin D.S. *Modelirovaniye raboty elektricheskoi skhemy i vrashchayushchegosya transformatora dlya beskontaktnoi sistemy petaniya sverkhprovodnikovykh katushek. Tezisy 17-i Mezhdunarod. konf. «Aviatsiya i kosmonavtika-2018»* (Simulating the operation of the electric circuit and rotating transformer for a contactless power supply system of superconducting coils, in Proceedings of the 17th International Conference «Aviation and Astronautics-2018», 2018, pp. 170–171.

3. Dezhin D.S., Ivanov N.S., Kobzeva I.N., Kovalev K.L. *Elektrotehnika — in Russ. (Electrical Engineering)*, 2018, No. 2, pp. 2–7.

4. Dezhin D.S., Kovalev K.L., Verzhbitskiy L.G., Kozub S.S., Firsov V.P. Design and Testing of 200 kW Synchronous Motor with 2G HTS Field Coils. — IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. (EES): Proceedings of Intern. Conf. on Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering-2017, Russia, No. 87 (2017), pp. 1–7.

5. Kovalev L.K., Kovalev K.L., Koneyev S.M.-A., Penkin V.T., Poltavets V.N., Il'yasov R.I., Dezhin D.S. *Elektricheskiye mashiny i ustroystva na osnove massivnykh vysokotemperaturnykh sverkhprovodnikov* (Electrical machines and devices made on the basis of bulky high-temperature superconductors), 2010, 369 p.

6. Penkin V.I., Kovalev K.L. *Sinkhronnye elektricheskiye mashiny s kompozitnymi i ob'emnymi sverkhprovodnikami v rotore dlya transportnykh sistem* (Synchronous electrical machines with composite and bulk superconductors in the rotor for transport systems), 2018, 216 p.

7. Dubenskii G.A., Modestov K.A., Kovan Yu.I., Kovalev K.L., Larionov A.Ye. *Electrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 2019, No. 6, pp. 4–12.