

12

Экспериментальная гибридная энергетическая магистраль с жидким водородом и сверхпроводящим кабелем на основе диборида магния (MgB_2)

© В.В. Костюк, И.В. Антюхов, Е.В. Благов, В.С. Высоцкий,
Б.И. Каторгин, А.А. Носов, С.С. Фетисов, В.П. Фирсов

Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН (ИНМЭ РАН), Москва
E-mail: blagovev@mail.ru

Поступило в Редакцию 23 ноября 2011 г.

Представлены результаты разработки и испытания экспериментальной „гибридной“ энергетической магистрали с жидким водородом и сверхпроводящим силовым (СПС) кабелем на основе диборида магния (MgB_2). Впервые определены значения критического тока СПС-кабеля на основе диборида магния при вынужденном течении жидкого водорода в диапазоне температур 20–26 К. Были реализованы различные режимы криостатирования СПС-кабеля как недогретым, так и насыщенным жидким водородом в широких диапазонах расхода от 7 до 200 g/s и давления от 0.15 до 0.4 МПа жидкого водорода.

Наиболее перспективным решением проблемы передачи больших потоков энергии (десятки и сотни GW) на дальние расстояния (тысячи километров) являются „гибридные“ водородные энергетические магистрали, в которых в сочетании с транспортом жидкого водорода по криогенной магистрали осуществляется передача электроэнергии по сверхпроводящим кабелям постоянного тока [1]. Известно, что водород относится к самым эффективным энергоносителям, который имеет самую высокую плотность энергии среди других видов топлив и обладает хорошими охлаждающими свойствами в жидком состоянии. Кипящий водород имеет теплоту испарения 446 kJ/kg, в то время как для жидкого гелия и жидкого азота теплота испарения составляет 20.28 и 199.1 kJ/kg соответственно. „Бесплатный“ холод в потоке водорода позволяет использовать сверхпроводящие кабели в криогенных магистралях для дополнительной передачи электричества, что значительно увеличивает плотность передачи потока энергии [2]. Помимо этого,

данное решение является наиболее перспективным также с позиции решения экологических проблем, относящихся к важнейшим приоритетам социальной стратегии современного этапа развития общества.

Целью данной работы являлась разработка технических и конструкторских решений для оценки перспектив реализации концепции создания „гибридных“ энергетических магистралей по передаче больших потоков энергии и возможности практического применения в качестве токонесущего элемента силового кабеля новейшего сверхпроводника на основе соединения диборида магния (MgB_2). В рамках выполнения работ были поставлены и решены следующие задачи:

разработка и создание экспериментального образца сверхпроводящего силового кабеля (далее ЭО СПС-кабеля) с критическим током до 3 кА при температуре 20 К на основе соединения диборида магния (MgB_2) с критической температурой 39 К;

разработка и создание макета „гибридной“ энергетической магистрали с рабочим давлением до 10 бар и с размещенным в ней ЭО СПС-кабелем;

разработка и изготовление тоководов для ЭО СПС-кабеля, работающих в среде жидкого водорода при давлении до 10 бар с использованием полиимидных композитных материалов;

проведение испытаний экспериментальной гибридной энергетической магистрали в диапазоне температур от 20 до 26 К при вынужденном течении жидкого параводорода с использованием специализированного стенда, предназначенного для проведения испытаний кислородно-водородных жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) и водородного производства Испытательного комплекса Открытого акционерного общества „Конструкторское бюро химавтоматики“, г. Воронеж (ИК КБХА).

Масштабные экспериментальные исследования возможности применения новых сверхпроводников в каналах с жидким параводородом выполнены впервые.

Исходным материалом для изготовления токонесущего элемента ЭО СПС-кабеля являлись сверхпроводящие ленты MgB_2 фирмы Columbus Superconductor [3]. Эта фирма на сегодняшний день является единственным в мире коммерческим производителем готовых к применению (без дополнительной термообработки) лент на основе MgB_2 . Сверхпроводящие свойства соединения MgB_2 были открыты в 2001 году [4]. Значение критической температуры сверхпроводящего перехода MgB_2 составляло порядка 35–39 К. В настоящее время доступные проводники на

основе MgB_2 имеют критические значения конструктивной плотности тока около 220 A/mm^2 и более в собственном поле при 20 К. Этого вполне достаточно для создания силовых сверхпроводящих кабелей постоянного тока. Низкая стоимость сверхпроводящих проводов и лент из этого соединения уже вызывает большой интерес к их использованию в электроэнергетике.

Конструкция разработанного ЭО СПС-кабеля состояла из трех основных элементов: формера, основного токонесущего слоя и изоляции.

Формер являлся центральным элементом и выполнял несущую роль. Формер состоял из основной несущей спирали, изготовленной из нержавеющей стали и формирующей внутренний канал для потока жидкого параводорода диаметром 12 мм; скруток пучков медных проволок с суммарным сечением, обеспечивающим надежную защиту основного токонесущего слоя в случае короткого замыкания, и обмотки из медных или других металлических лент, создающих гладкую поверхность формера для укладки исходных сверхпроводящих лент основного токонесущего слоя.

Основной токонесущий слой состоял из двух последовательно соединенных между собой слоев (повивов), собранных из пяти уложенных спирально на формер лент на основе MgB_2 и изолирующего материала между слоями.

Изоляция состояла из 20 слоев полиимидной пленки толщиной $50 \text{ }\mu\text{m}$. Общая толщина изоляции составляла 1 мм, что позволяло работать кабелю в общем случае при напряжениях до 20 кВ.

Общий вид и сечение кабеля представлены на рис. 1.

Диаметр ЭО СПС-кабеля составлял 26 мм, а его длина $\sim 10 \text{ м}$. Таким образом, общая длина токонесущего элемента ЭО СПС-кабеля с учетом двухслойной намотки составляла $\sim 20 \text{ м}$. Кабель рассчитывался на значение критического тока до 3 кА при температурах $\sim 20 \text{ К}$.

Гибридная энергетическая магистраль выполняет функции транспорта жидкого параводорода при температурах 20–30 К и одновременного криостатирования сверхпроводящего кабеля для передачи электроэнергии. Эти магистрали должны обладать низкими гидравлическими потерями с сохранением высокой производительности и большим коэффициентом теплоотдачи по длине и сечению. Для моделирования электрических и теплогидравлических процессов в гибридных магистралях была разработана и изготовлена специальная водородная криогенная магистраль.

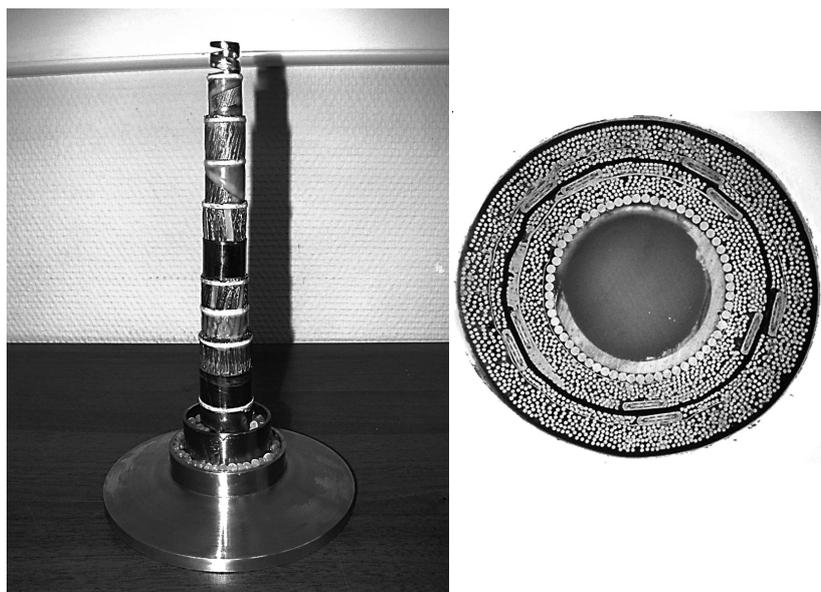


Рис. 1. Общий вид и сечение ЭО СПС-кабеля.

В этой магистрали течение жидкого параводорода осуществлялось по двум каналам: внутреннему осевому, созданному формером ЭО СПС-кабеля, и внешнему кольцевому — между внешней оболочкой кабеля диаметром 28 mm и внутренней стенкой криостата диаметром 40 mm. Внутренний канал обеспечивал интенсификацию теплоотдачи за счет закрутки потока спиралью формера и создания пристенных отрывных зон. При этом, однако, наблюдалось возрастание более чем в два раза гидравлических потерь по сравнению с гладким каналом. Транспорт жидкого параводорода в магистрали осуществлялся при температуре жидкости ниже температуры насыщения, т. е. в недогретом состоянии. Это обеспечивало заполнение всего сечения пористого канала кабеля, образованного пучками медных проволок, жидкостью с высокой теплопроводностью (теплопроводность жидкого параводорода составляет $15.6 \text{ m}^2/\text{s}$, что почти в три раза выше, чем у жидкого азота). Таким образом, для созданной конструкции гибридной энергетической магистрали с жидким параводородом были характерны большие коэффициенты теплоотдачи на внутренней и внешней теплоот-

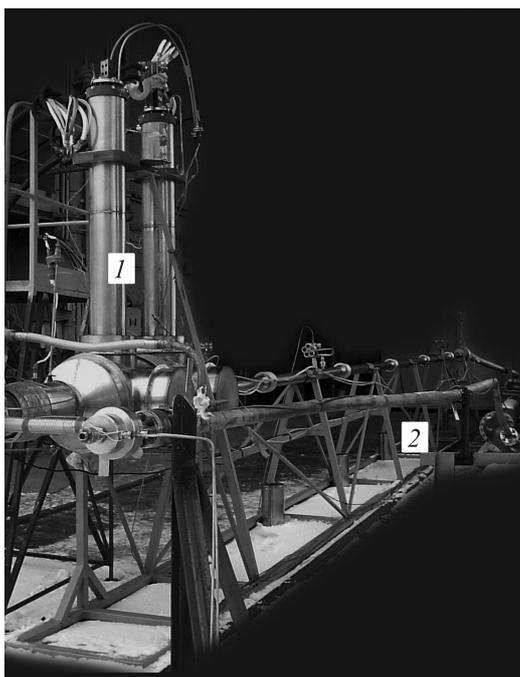


Рис. 2. Экспериментальная „гибридная“ энергетическая магистраль: 1 — токовводы ЭО СПС, 2 — магистраль.

дающих поверхностях и высокая эффективная температуропроводность в его сечении. Это обеспечивало условия тепловой стабилизации, препятствующей аварийному переходу ЭО СПС-кабеля из сверхпроводящего в нормальное состояние.

Общий вид макета гибридной энергетической магистрали, подготовленной к испытаниям, представлен на рис. 2.

Макет состоял из 6 секций с экранно-вакуумной изоляцией, соединенных сваркой, и включал в себя следующие основные узлы и элементы: протяженный криостат с экранно-вакуумной теплоизоляцией (ЭВТИ); ЭО СПС-кабеля; два токоввода, обеспечивающих электрическое соединение низкотемпературной зоны кабеля с источниками тока.

Вакуумная полость макета разделена на три участка (вакуумная полость криостата токовводов и две полости на протяженном крио-

стате). Для обеспечения безопасности работ на этих участках были установлены предохранительные мембраны на случай нарушения вакуума и повышения давления в экран-вакуумной изоляции из-за возможных натеканий жидкого водорода из внутренней оболочки криостата.

Поддержание постоянного массового расхода жидкого водорода при заданном давлении на входе в магистраль осуществлялось с помощью жиклера диаметром 4 мм. Жиклер был установлен на входе из магистрали для создания критического расхода параводорода.

Контроль электрических и тепловых параметров системы осуществлялся с помощью 4 потенциальных датчиков, 4 датчиков температуры и 2 датчиков давления, установленных на входе и выходе магистрали.

Снижение теплопритоков к низкотемпературному тракту с жидким водородом макета обеспечивалось использованием в конструкции криостата 50-слойной экранно-вакуумной теплоизоляции.

Макет был смонтирован на жесткой раме длиной 10180 мм и шириной 800 мм. Откосы, закрепленные к раме, обеспечивали вертикальную устойчивость двух тоководов высотой 1260 мм. Общая высота макета от уровня пола составляет 2476 мм.

Для подвода электроэнергии к сверхпроводящему кабелю были разработаны и изготовлены тоководы, в которых для обеспечения электрической и вакуумной изоляции были использованы специальные соединения, изготовленные из нержавеющей стали и полиимидных композитных материалов.

Общий вид тоководов для ЭО СПС-кабеля показан на рис. 2. Конструкция токовода состоит из следующих основных узлов и элементов: криостата, образованного внутренней и внешней оболочками диаметрами 270 и 370 мм соответственно; гибкого токопровода сечением 600 мм² с дистанцирующими опорами; изолирующей полиимидной трубы с наружными бандажами и приваренными законцовками из нержавеющей стали в виде опорных фланцев, что позволяло подводить электроэнергию к кабелю в общем случае при напряжениях до 20 кВ; дистанцирующих неэлектропроводных вставок из фторопласта.

Между оболочками криостата была установлена ЭВТИ. Внутри криостата осуществлялось соединение сверхпроводников с тоководами гибкими шинами из провода ПЩ (провод гибкий из скрученных медных проволок) с помощью пайки.

Полный цикл испытаний макета „гибридной“ энергетической магистрали при вынужденном течении жидкого водорода проводился

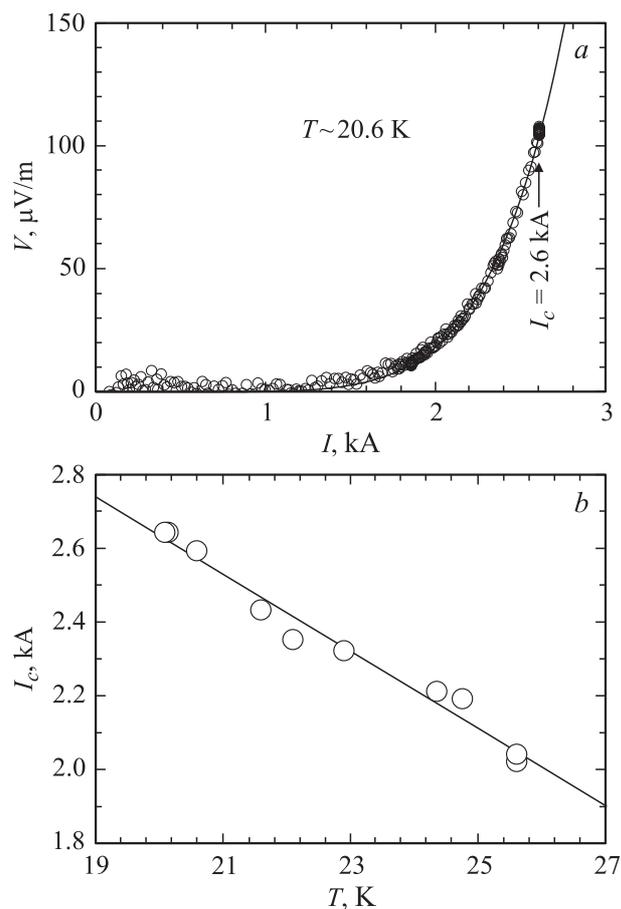


Рис. 3. Токвые характеристики ЭО СПС-кабеля на основе диборида магния: *a* — вольт-амперная характеристика кабеля при температуре 20.6 К, критический ток равен $\sim 2600 \text{ A}$; *b* — зависимость критического тока кабеля от средней по длине кабеля температуры жидкого водорода.

с использованием специализированного стенда, предназначенного для проведения испытаний кислородно-водородных ЖРД и водородного производства ИК КБХА (г. Воронеж) в ноябре 2011.

Перед началом испытаний использовался комбинированный метод очистки внутренних полостей газообразным азотом, а затем газообразным водородом.

Захлаживание тракта магистрали осуществлялось в два этапа. Массовый расход водорода в начальной стадии составляет 2 g/s, а при поступлении жидкости на вход в жиклер — 7 g/s. Время захлаживания составило 260 s. Суммарный теплоприток через криостат кабеля составил 90–100 W. Гидравлические потери были не выше 0.01 МПа.

Величина тока в кабеле задавалась источниками тока Agilent 6680A и измерялась с помощью стандартного шунта 7500Ф-75 mV. Выходной сигнал с шунта и значения напряжений с потенциальных контактов кабеля регистрировались цифровым многоканальным осциллографом. Управление источниками тока и осциллографом осуществлялось дистанционно по каналам связи. Измерения токовых характеристик СПС-кабеля проводились при температурах жидкого водорода в диапазоне от 20 до 26 К, при давлениях от 0.15 до 0.4 МПа и массовых расходах жидкого водорода от 7 до 200 g/s.

За критическую величину $I_c(T)$ при данной температуре T принималось значение силы тока, при котором напряженность электрического поля между потенциальными контактами составляла $100 \mu\text{V/m}$.

Одновременно с измерением напряжений на внутреннем и внешнем токонесущих слоях кабеля регистрировались значения температуры, давления и расхода жидкого водорода в магистрали.

Типичная зависимость напряжения на токонесущем слое от тока (вольт-амперная характеристика) показана на рис. 3, а. Величины критических токов, определенные по таким зависимостям, составили ~ 2640 А при температуре 20.4 К и ~ 2020 А при температуре 25.7 К. На рис. 3, б показана зависимость критического тока от температуры. Изменение температуры по длине кабеля составляло от 0.2 до 0.9 К и зависело от массового расхода водорода.

Работы выполнены в рамках реализации программы президиума РАН „Фундаментальные основы развития энергетических систем и технологий, включая ВТСП“.

Авторы выражают благодарность за обеспечение работ по изготовлению и проведению испытаний экспериментальной гибридной энергетической магистрали с жидким водородом и сверхпроводящим кабелем работникам ЗАО „Экотехнология“ и работникам ОАО КБХА (г. Воронеж).

Список литературы

- [1] Волков Э.П., Костюк В.В., Карпышев А.В., Фирсов В.П. // Изв. РАН. Энергетика. 2011. № 1. С. 3–6.
- [2] Rubbia C. The future of large power electric transmission.
http://www.iasspotdam.de/fileadmin/user_upload/Rubbia_presentation.pdf.
- [3] Columbus Superconductor SpA.
<http://www.columbussuperconductors.com/mgb2.thm>.
- [4] Jun Nagamatsu, Norimasa Nakagawa, Takahiro Muranaka, Yuji Zenitani, Jun Akimitsu // Nature. 2001. V. 410. P. 6824.