

СТЕНДЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТЕРЬ И КРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ОБРАЗЦОВ ВО ВНЕШНИХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

При разработке всякой сверхпроводящей магнитной системы важную роль играет информация о величине потерь в сверхпроводнике и его критических параметров (критических плотности тока и индукции) в реальных условиях эксплуатации (при воздействии на сверхпроводник переменных и постоянных магнитных полей). Из-за сложности физических процессов, протекающих в сверхпроводнике и конструкции современных сверхпроводящих магнитных систем, эта проблема трудноразрешима. В связи с этим были разработаны два экспериментальных стенда, позволяющих исследовать параметры сверхпроводника при влиянии внешних факторов.

Ключевые слова: сверхпроводник, критические параметры сверхпроводника, магнитное поле, измерение потерь мощности, calorиметрический метод определения мощности.

При разработке сверхпроводниковых систем различного назначения особое звучание приобретает вопрос точной информации о значениях критических параметров сверхпроводящих материалов (критической плотности тока J_c от магнитной индукции B), используемых при изготовлении данных систем.

Специфика сверхпроводниковых систем заключается в том, что они в процессе эксплуатации подвергаются воздействию магнитных полей различного характера и разного происхождения, вызывающих потери в сверхпроводящем материале, что, в свою очередь, приводит к вариации значений критических параметров сверхпроводника. Из-за сложности физических процессов, протекающих в сверхпроводнике, теоретически рассчитать эти потери и критические параметры последнего весьма затруднительно, поэтому, как правило, значения потерь и критических параметров сверхпроводников определяются экспериментально путем их косвенного измерения. Для осуществления этого были созданы два экспериментальных стенда. Один из которых был предназначен для измерений потерь в сверхпроводящих образцах, находящихся в скрещенных магнитных полях (постоянном и переменном) при различной ориентации исследуемого образца по отношению к постоянному магнитному полю calorиметрическими методами [1–6] или методом затухания тока в короткозамкнутом образце.

Calориметрический метод определения потерь мощности, рассмотренный в работе, основан

на определении количества тепла, рассеиваемого на нагрузке, являющейся поглощающим сопротивлением вследствие ухудшения свойств сверхпроводника. Термодинамическое состояние calorиметрической нагрузки объемом V , равномерно нагретой до температуры T , описывается уравнением

$$P_n = H(T - T_{cp}) + cV(dT/dt), \quad (1)$$

где P_n — мощность, рассеиваемая в нагрузке; T — температура среды, в которой находится нагрузка; V — коэффициент теплоотдачи; c — удельная теплоемкость нагрузки.

Первое слагаемое в (1) характеризует рассеяние тепла, обусловленное теплопроводностью, конвекцией и излучением. Обычно рассеяние имеет смешанный характер и V зависит от разности температур и других факторов. Второе слагаемое определяет приращение температуры calorиметрической нагрузки под действием рассеиваемой в ней мощности P_n . Если на нагрузке с начальной температурой, равной температуре окружающей среды, начиная с момента времени $t = 0$, рассеивается мощность P_n , то решение уравнения (1) имеет вид

$$T - T_{cp} = P_n[1 - \exp(-t/\tau)]/H, \quad (2)$$

где $\tau = cV/H$ — тепловая постоянная времени.

Для любого calorиметра по результатам измерения разности температур $T - T_{cp}$ можно вычислить мощность, если известны постоянные в (2).

На практике определение таких постоянных затруднено.

Калориметрический метод, используемый для построения экспериментальных стендов, основан на преобразовании электромагнитной энергии в изменение тепловой энергии жидкого гелия, содержит устройство, обеспечивающее циркуляцию жидкого гелия, и средства для измерения температуры. Измеряемая мощность зависит от скорости поглощения энергии и определяется равенством

$$P = kvBc\Delta T, \quad (3)$$

где $k = 4,187$; v — скорость протекания жидкости через нагрузку; B — плотность жидкости; c — удельная теплоемкость жидкости; ΔT — разность температур.

При точных измерениях необходимо знать скорость потока и удельную теплоемкость протекающей жидкости во всем интервале рабочих температур. Кроме того, должны быть известны и другие параметры, не входящие в (3), такие как скорость тепловых потерь из системы и повышение температуры протекающей жидкости, обусловленное трением.

Результирующее магнитное поле, действующее на образец, создавалось двумя сверхпроводящими обмотками: обмоткой постоянного магнитного поля и обмоткой переменного поля; последняя имела две модификации: обмотка пульсирующего поля, обмотка вращающегося магнитного поля. Постоянное магнитное поле могло достигать значения 3 Тл, а переменное поле — 0,1 Тл.

Питание обмотки постоянного тока осуществлялось от генератора постоянного тока типа НДМ-1500/750 мощностью 9 кВт (напряжение 6 В, ток 1500 А) либо от выпрямительного блока ВСА-5К (ток 12 А, напряжение 65 В).

Обмотка переменного поля запитывалась от агрегата, включающего синхронный трехфазный явнополюсный генератор мощностью 33 кВт с приводным двигателем постоянного тока П-82М мощностью 31 кВт. Возбуждение синхронного генератора осуществлялось от возбуждателя П-41 мощностью 27 кВт с приводом от асинхронного двигателя А-42-4.

Исследуемый образец представлял собой либо набор отдельных сверхпроводников, либо катушку 1 малых размеров (рис. 1, здесь показана схема только измерительной части стенда), питаемую от источника постоянного тока ВСА-5К, с датчиком магнитного поля при исследовании влияния транс-

портного тока на потери в сверхпроводниках. Исследуемый образец располагался внутри термостата 3, выход которого был подключен к счетчику газообразного гелия типа ГСБ-400 2, имевшего пропускную способность 400 л/ч. Все внутренние элементы установки были изготовлены из неметаллических материалов.

При измерении калориметрическим методом сначала определялся объем газообразного гелия, образовавшегося при испарении жидкого гелия из-за потерь в образце. Учитывая, что скрытая теплота парообразования гелия при температуре 4,2 К и давлении 1 атм составляет 20,9 кДж/кг, а плотность газообразного гелия при нормальных условиях равна 0,1785 кг/м³, можно рассчитать потери. К примеру, при температуре измерения объема 20 °С выделение мощности в 1 Вт при 4,2 К дает скорость парообразования $2,88 \times 10^{-4}$ м³/с. Пары гелия, образовавшиеся за счет теплопритока по тоководам или через теплоизоляцию криостата, отводятся через вентиль V1. Давление и уровень жидкого хладагента внутри и снаружи термостата 3 поддерживаются одинаковыми, чтобы хладагент внутри и снаружи колокола кипел при одной и той же температуре и для предотвращения ситуации, при которой жидкий хладагент полностью вытесняется из-под термостата или, наоборот, выталкивается в газосборную трубу, что достигалось регулированием давления с помощью вентиля V1 и V2. Это позволило свести к минимуму разность уровней жидкости h в U-образном манометре 6. В качестве жидкости использовалось масло, поэтому разность уровней гелия равнялась примерно $6h$, т.к. удельный вес жидкого гелия — 0,125 г/см³.

Газообразный гелий перед счетчиком подогревался до комнатной температуры в медном змеевике, помещенном в водяной термостат 7.

Внутри термостата располагалось градуировочное сопротивление 4.

В свою очередь термостат был помещен в гелиевый криостат 5.

Стенд позволил измерять потери энергии в различных сверхпроводящих обмоточных материалах, предназначенных для работы в переменных магнитных полях частотой до 50 Гц и небольшой амплитуды на фоне сильного постоянного магнитного поля, что характерно для магнитов подвеса высокоскоростного наземного транспорта [7–18].

Назначением второго стенда (рис. 2) было обеспечение измерений критических параметров (значений критической плотности тока J_c от магнитной индукции B_c) образца из высокотемпературного

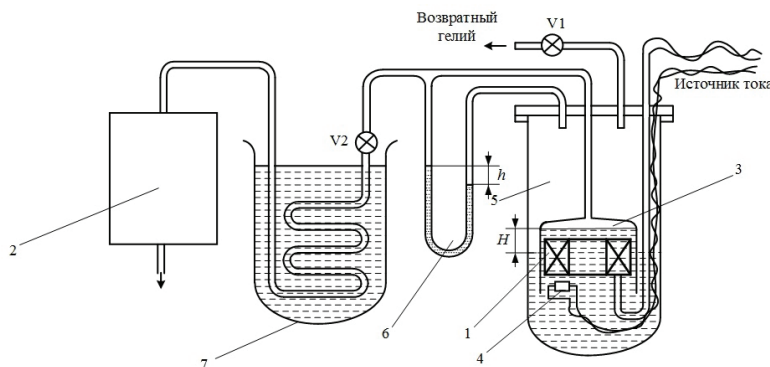


Рис. 1. Измерительная часть стенда

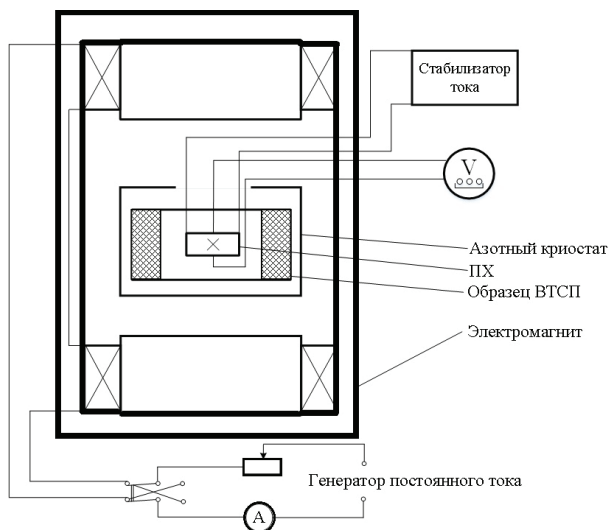


Рис. 2. Стенд для измерения критических параметров образца из ВТСП

сверхпроводника (ВТСП), находящегося в однородном постоянном магнитном поле.

В качестве образцов использовались кольца из ВТСП с внутренним диаметром 11 мм и наружным диаметром 17 мм.

Основным элементом стенда являлся электромагнит с цилиндрическими полюсами, неоднородность магнитной индукции в зазоре не превышала 0,1 %/см. Электромагнит запитывался от генератора постоянного тока. Величина тока в обмотках электромагнита контролировалась амперметром. При токе 24 А магнитная индукция в зазоре составляла 1,5 Тл.

Перед началом измерений электромагнит разматывался полем минимальной напряженности, для чего многократно (5–10 раз) изменялось направление тока в обмотках электромагнита с помощью переключателя П. Контроль разматывания осуществлялся преобразователем Холла (ПХ), расположенным в зазоре между полюсами электромагнита.

В зазоре между полюсами электромагнита располагался азотный криостат с образцом из ВТСП. Внутри образца находился цилиндрический зонд с ПХ. Чувствительность ПХ к магнитному полю предварительно определялась с помощью тесламетра ядерно-магнитного резонанса типа Ш1-1 [15]. По амперметру в зазоре электромагнита устанавливалось начальное значение магнитной индукции, которое превышало значение критического магнитного поля B_c для данного образца при плотности тока $J = 0$. Величина магнитной индукции измерялась ПХ, который был подключен к цифровому вольтметру Щ1516. Затем в азотный криостат заливался жидкий азот.

После захлаживания образца магнитная индукция в зазоре плавно уменьшалась. Если при уменьшении магнитного поля показания ПХ также уменьшались, значит, образец остался несверхпроводящим. При дальнейшем уменьшении магнитного поля в зазоре электромагнита наступал момент, когда показания ПХ становились неизменными. В этом случае можно было считать, что образец из ВТСП перешел в сверхпроводящее состояние, т. е. он находится в режиме «замороженного» магнитного потока.

По показаниям ПХ определялось значение критического поля B_{c1} , т. к. плотность тока в этом случае $J_{c1} = 0$.

Для определения других точек зависимости плотности критического тока J_c от магнитного поля B_c магнитный поток «замораживался» в образце при значениях магнитной индукции в зазоре электромагнита меньше B_{c1} , затем магнитная индукция в зазоре увеличивалась до момента перехода сверхпроводящего образца в нормальное состояние.

По показаниям ПХ определялось изменение токоосцепления образца, а знание сечения образца позволило определить величину критической плотности тока.

Технические характеристики стенда

Диаметр полюсов электромагнита, мм350
 Зазор между полюсами электромагнита, мм ..100
 Внутренний диаметр образца (кольца) из ВТСП, мм ≥ 6
 Внешний диаметр образца (кольца) из ВТСП, мм..... ≤ 100

Погрешность измерения магнитной индукции в зазоре электромагнита, Тл..... $< 0,05$

Температурный диапазон испытаний, К.....(77 ... 293)

В отличие от аналогов, не применяется вжигание электродов в сверхпроводящие образцы.

Заключение.

Созданные два экспериментальных стенда позволяют измерить потери в сверхпроводнике и его критические параметры (критическая плотность тока и индукцию) в реальных условиях эксплуатации (при воздействии на сверхпроводник переменных и постоянных магнитных полей).

Стенды могут использоваться в электрофизике, криогенном машиностроении, метрологии и других отраслях промышленности.

Библиографический список

1. Глебов И. А., Лаверик Ч., Шахтарин В. Н. Электрофизические проблемы использования сверхпроводимости. Л.: Наука, 1980 254 с.
2. Fietz W. A. Electronic Integration Technique for Measuring Magnetization of Hysteretic Superconducting Materials // Review of Scientific Instrument. 1965. Vol. 36 (11). P. 1621. DOI: 10.1063/1.1719406.
3. Лаптиенко А. Я., Похилов В. А. Исследование параметров соединительных контактов обмоточных сверхпроводников // Вопросы атомной науки и техники. 1986. Вып. 2, № 6. С. 27.
4. Лаврова В. В., Фишер Л. М., Юдин В. А. Установка для измерения потерь в сверхпроводниках в переменном магнитном поле // Вопросы криоэлектроники и низкотемпературного эксперимента: материалы семинара. Киев: Наукова Думка, 1976. С. 37–39.
5. Robert C. Richardson. Experimental Techniques in Condensed Matter Physics at Low Temperatures. NY: CRC Press, 2018. 352 p. ISBN 978-0367091217.
6. Grilli F., Kario A. How filaments can reduce AC losses in HTS coated conductors: a review // Superconductor Science and Technology. 2016. Vol. 29 (8). DOI: 10.1088/0953-2048/29/8/083002.
7. Ким К. К. Системы электродвижения с использованием магнитного подвеса и сверхпроводимости: моногр. М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2007. 360 с. ISBN 978-5-89035-527-0.
8. Антонов Ю. Ф., Зайцев А. А. Магнитолевитационная транспортная технология. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. 476 с. ISBN 978-5-9221-1540-7.

9. Бочаров В. И., Салли И. В., Дзензерский В. А. Транспорт на сверхпроводящих магнитах. Ростов: Изд-во Ростовского ун-та, 1988. 152 с. ISBN 5-7507-0053-4.

10. Бахвалов Ю. А., Бочаров В. И., Винокуров В. А., Нагорский В. Д. Транспорт с магнитным подвесом. М.: Машиностроение, 1991. 320 с.

11. Иванов С. Н. Системы управления электротехническими устройствами для генерации тепловой энергии и транспортирования теплоносителя // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2010. Вып. 3. С. 249–257.

12. Никитин В. В., Стрепетов В. М. Энергообеспечение бортовых электромагнитов комбинированной системы левитации и тяги на переменном токе // Транспортные системы и технологии. 2017. № 3(9). С. 25–38.

13. Никитин В. В., Стрепетов В. М., Волювач А. С. Анализ вариантов построения системы электроснабжения транспортного средства с комбинированной системой левитации и тяги на переменном токе // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2010. № 3-4. С. 54–62.

14. Стрепетов В. М., Никитин В. В. Оценка энергетической эффективности пусковых режимов работы комбинированной системы левитации и тяги на однофазном переменном токе // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2006. № 2. С. 145–159.

15. Сика З. К., Куркалов И. И., Петров Б. А. Электродинамическая левитация и линейные синхронные двигатели транспортных систем. Рига: Зинатне, 1988. 258 с.

16. Кочетков В. М. О левитационном качестве систем электродинамического подвешивания со сплошной путевой структурой // Известия вузов. Электромеханика. 1983. № 2. С. 5–10.

17. Ким К. К., Ткачук А. А., Кузнецов А. А. Двухканальный электрический уровнемер жидкого гелия // Омский научный вестник. 2019. № 4 (166). С. 52–54. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-166-52-54.

18. 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.

КИМ Константин Константинович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электротехника и теплоэнергетика» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 3278-4938

AuthorID (РИНЦ): 690443

AuthorID (SCOPUS): 56092209700

ТКАЧУК Антон Андреевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и теплоэнергетика» ПГУПС, г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 7335-2340

AuthorID (РИНЦ): 726854

КУЗНЕЦОВ Андрей Альбертович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Теоретическая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения, г. Омск.

SPIN-код: 5259-0531

AuthorID (РИНЦ): 358976

AuthorID (SCOPUS): 56824984500

Адрес для переписки: kuznetsovaa.omgups@gmail.com

Для цитирования

Ким К. К., Ткачук А. А., Кузнецов А. А. Стенды для измерения потерь и критических параметров сверхпроводящих образцов во внешних магнитных полях // Омский научный вестник. 2020. № 3 (171). С. 70–73. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-171-70-73.

Статья поступила в редакцию 26.03.2020 г.

© К. К. Ким, А. А. Ткачук, А. А. Кузнецов