



УДК 538.945

Обзор

Обзор систем охлаждения сверхпроводниковых накопителей энергии

Д. А. Александров^{1,*}, С. В. Покровский¹

¹ НИЯУ МИФИ, Каширское ш., 31, 115409 Москва, Россия

* e-mail: dimax.2001@mail.ru

Поступила в редакцию 02.12.2024, после переработки 12.12.2024, принята к публикации 19.12.2024.

Сверхпроводниковые индуктивные накопители энергии (СПИН) являются перспективными высокоэффективными устройствами для хранения энергии. Устройства СПИН находят различные применения, например, в микросетях, гибридных электромобилях, возобновляемых источниках энергии, и других. Для стабильной и эффективной работы индуктивных накопителей необходима хорошо проработанная система охлаждения, при помощи которой возможно добиться более высоких критических токов и меньших потерь переменного тока. В настоящем обзоре представлены различные конструкции и проекты СПИН, отсортированные по типам системы охлаждения.

Ключевые слова: ВТСП; СПИН; соленоид; криокулер.

DOI: 10.62539/2949-5644-2024-0-4-20-31

1. Введение

Сверхпроводниковый индуктивный накопитель энергии (СПИН) состоит из сверхпроводящей катушки, также называемой магнитом, криостата, в котором находится магнит, и блока охлаждения. Охлаждение обычно осуществляется либо путем погружения катушки в криогенную жидкость, такую как жидкий азот (LN₂), жидкий гелий (LHe) или жидкий водород (LH), либо с помощью криокулера (КК). Роль криостата в СПИН заключается в термической изоляции охлаждаемого магнита от окружающей среды. В некоторых очень требовательных приложениях СПИН используется комбинация жидкого хладагента и КК.

Распространенные конструкции КК включают в себя две тепловые ступени: высокотемпературную ступень с большей охлаждающей способностью и низкотемпературную ступень, с гораздо более низкой мощностью охлаждения. Во многих конструкциях СПИН такие его компоненты как токовводы и тепловая защита, охлаждаются с помощью первой, высокотемпературной ступени КК или жидкого теплоносителя.

Каждый метод охлаждения имеет свои преимущества и недостатки. Погружной метод более термостабилен, однако его недостатком является наличие теплопритоков от криогенной жидкости к криостату и непрактичность при создании небольших систем. Кондуктивный метод охлаждения не столь термостабилен, но имеет значительно меньшие теплопритоки [1].

Существуют две основные конструкции СПИН: соленоидная и тороидальная. В первом случае магнит представляет из себя либо «панкейк» катушки (ПК), либо «дабл-панкейк» катушки (ДПК). Во втором случае секции СПИН (ДПК или ПК) размещены в форме тора. Также существуют непрерывные конфигурации СПИН (рис. 1) [2]. Тороидальный СПИН имеет больший габаритный размер по сравнению с соленоидом той же мощности, и, следовательно, требует большей мощности охлаждения из-за больших лучистых теплопритоков [3].

В большинстве случаев магниты СПИН пропитываются специальной эпоксидной смолой для улучшения теплопроводности, теплового сжатия и структурной целостности. Исследование параметров конвективного и кондуктивного режимов охлаждения приведено в [4]. Метод анализа для оценки теплового поведения при использовании различных токов разряда

в магнитах с кондуктивным охлаждением приведен в [5]. В этом анализе также использовался МКЭ, в котором скорость теплового потока от КК не превышала его холодопроизводительности.

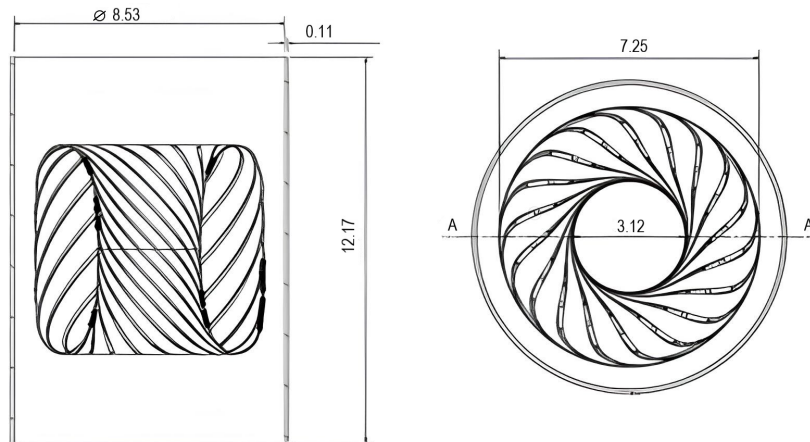


Рис. 1. Торoidalная непрерывная геометрия СПИН. Вид в разрезе (слева) и сверху (справа) [2].

2. Схемы охлаждения

Ниже представлены наиболее часто встречающиеся методы охлаждения ВТСП устройств, в том числе СПИН. Классификация предложена в работе [6]:

1. Погружной метод с использованием LN2 и LHe
2. Криокулерное охлаждение без жидкого хладагента;
3. КК с жидкостным охлаждением радиационной изоляции и/или токовводов;
4. КК с установленным конденсатором для реконденсации гелия в герметичном сосуде;
5. КК с установленным сосудом для затвердевания LN2;
6. КК с установленными трубками для циркуляции газообразного или жидкого теплоносителя;

Каждая из схем охлаждения имеет свои преимущества и недостатки с точки зрения конструкции и тепловой стабильности СПИН. Тепловые потери происходят только за счет теплопроводности и излучения. Лучистые теплопритоки определяются с помощью уравнения Стефана-Больцмана

$$Q_{rad} = \varepsilon \sigma_{SB} A (T^4 - T_{surr}^4) \quad (1)$$

где Q_{rad} - чистая излучаемая мощность, ε - излучательная способность, σ_{SB} - постоянная Стефана-Больцмана, A - общая площадь поверхности, T - температура излучателя, T_{surr} - температура окружающей среды. Хорошо спроектированная система должна иметь как можно меньшую разницу температур между радиатором и окружающей средой. Радиатором обычно является металлическая катушка, реже — сосуд с жидким или твердым хладагентом, а окружающей средой — тепловой экран. Во всех конструкциях, представленных в вышеупомянутой классификации, для охлаждения теплового экрана и минимизации разницы температур с магнитом используются КК или LN2.

Кондуктивные теплопритоки (теплопритоки за счет теплопроводности твердого тела) на охлаждение происходят исключительно через токовводы, поэтому во многих случаях на токовводах используются специальные радиаторы. В конструкциях, относящихся к схемам 1, 4, 5 и 7, магнит помещается в сосуд с охлаждающей жидкостью, что позволяет добиться его равномерного охлаждения. В большинстве случаев в качестве охлаждающей жидкости используется LHe. В этом случае обязательна охлаждаемая радиационная защита. Например, в методе 7 магнит помещается в LN2, который далее затвердевает (SN2). Благодаря большой удельной энthalпии SN2 такая конструкция позволяет создавать портативные системы за счет увеличения

промежутка времени между циклами охлаждения [7]. Однако тепловой контакт между магнитом и SN2 может быть нарушен из-за тепловых возмущений. Для решения этой проблемы в некоторых случаях в сосуд добавляют жидкий неон, работающий при температурах от 4.2 до 25 К. Метод № 7 сложен в имплементации и нашел очень ограниченное применение в небольших испытательных системах. В работе [8] представлена схема СПИН на YBCO мощностью 2 ГДж, охлаждаемого по этой схеме. Результаты показывают, что эта система эффективна и позволяет легко контролировать температуру. Кроме того, система надежна в обслуживании, поскольку КК можно отделить от системы газового охлаждения. Схемы охлаждения с использованием переохлажденного LN2 (< 77 К) и LH использовались редко [9]. Переохлажденный LN2, который кипит при 77 К и отвердевает при 60 К, использовался скорее для трансформаторов и кабелей [10].

3. Погружная жидкостная система охлаждения

3.1. Тороидальные СПИН

В работе [2] представлен концепт (2.5 МВтч/12 ГДж) и лабораторная модель тороидального СПИН (10 МДж), разрабатываемого в НИИЭФА. Экранирующая конструкция включает в себя короткий однослойный соленоид и две однослойные дисковые катушки. Балансная обмотка и экранирующие катушки были электрически соединены последовательно. Тороидальная катушка состоит из 5×42 витков и проводит ток 945 кА. Лабораторная модель запасает ~ 20 кДж энергии и создает магнитное поле до 0.8 Тл. На рис. 2 представлена фотография лабораторной модели. Тестирование лабораторной модели проводилось в жидком гелии.

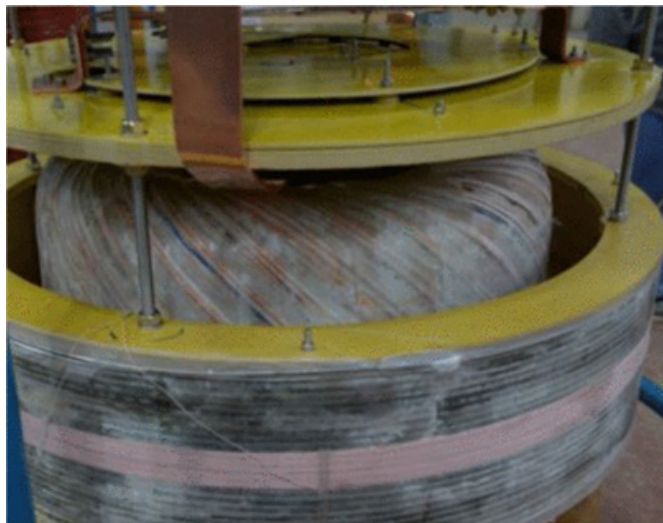


Рис. 2. Фотография лабораторной модели тороидального СПИН [2].

В работах [11, 12] представлен дизайн 30 МДж/5 МВт секционного тороидального СПИН с жидкостным охлаждением. Разработанный магнит состоит из 50 D-образных катушек, каждая из которых имеет 170 витков. Рабочий ток магнита составляет 1000 А, а общая длина используемых лент — 66.64 км. В Магнит в данной конструкции планируется охладить жидким хладагентом – водородом. Схема криогенной системы показана на рис. 3а. Криогенная система включает в себя разработанный сверхпроводящий магнит, дьюар и вспомогательные трубы. Сверхпроводящий магнит установлен в дьюаре LN2. Внутри внешнего вакуумного слоя дьюара LN2 установлен радиационный экран для уменьшения радиационного нагрева. Внешний криостат, содержащий LN2, способствует теплоизоляции устройства. LN2 поступает с нижней части дьюара, а газообразный водород откачивается с его верхней части. Дьюар оснащен системой защиты от квенча для контроля рабочего состояния системы.

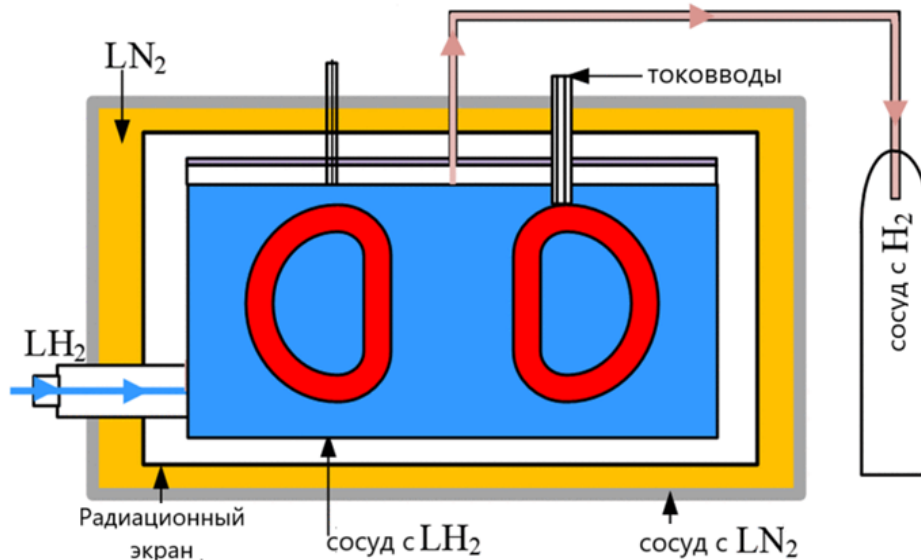


Рис. 3. Криостат СПИН (а). Схема системы защиты от квенча (б) [12].

3.2. Соленоидные СПИН

В [13] и [14] рассмотрена катушка соленоида 3 МДж/750 кВА из NbTi, состоящая из 36 жил диаметром 0.648 мм в виде кабеля Резерфорда прямоугольного сечения. Катушка изолирована каптоновой лентой и помещена в бобину, изготовленную из армированного стекловолокном пластика, которая охлаждается с помощью LHe. Два КК используются для охлаждения каждого из токовводов. Также криокулер используется для охлаждения теплового экрана до 60 К и для реконденсации LHe внутри криостата при мощности 1 Вт при 4 К. Конфигурация системы охлаждения показана на рис. 4. В этой конструкции основное внимание уделяется стабильности, а не минимизации потерь переменного тока. Информация о системе охлаждения ограничена. Из рис. 4 можно сделать вывод, что катушка очень компактно размещена внутри криостата, что снижает лучистые теплопритоки, но располагает магнит рядом с проводящими материалами, что увеличивает потери переменного тока.

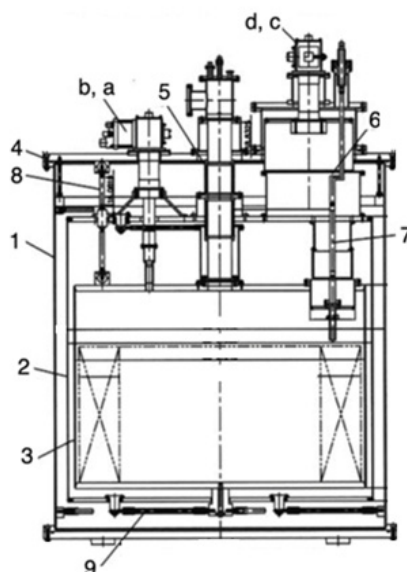


Рис. 4. Чертеж СПИН энергоёмкостью 3 МДж [14]. 1 – вакуумный сосуд, 2 – радиационный экран 60 К, 3 – сосуд с LHe, 4 – верхний теплообменник, 5 – вакуумный сосуд, 6 – токоввод, 7 – токоввод ВТСП, 8 – опора, 9 – опора, а – криокулер мощностью 1.5 Вт при 4.2 К, б – криокулер мощностью 1 Вт при 4.2 К, с – криокулер мощностью 80 Вт при 80 К и d – криокулер мощностью 180 Вт при 80 К.

В работе [15] описан СПИН (2.6 МДж/1.2 МВт), установленный в Elettra, источнике синхротронного излучения в Италии. Выбранная геометрия представляет собой соленоид, намотанный из сверхпроводящего кабеля Резерфорда (NbTi). Магнит полностью погружен в резервуар с LHe, который реконденсирован с помощью КК, внутри теплоизолированной вакуумной камеры. Между вакуумной камерой и резервуаром с гелием установлены два тепловых экрана, как показано на рис. 5. Система охлаждается до заданной температуры тремя двухступенчатыми КК. Ступень первого ЦК на 35 К соединена с первым тепловым экраном и центральной трубой, поддерживающей сосуд с гелием. Ступень с более низкой температурой 10 К также находится в контакте с центральной трубкой, но дополнительно соединена со вторым тепловым экраном, работающим при температуре 10 К. Второй КК, выполняющий функцию реконденсатора гелия, находится внутри другой трубки, которая соединяется с сосудом с гелием. Его первая ступень соединяет трубку с тепловым экраном 35 К, а вторая работает на мощности 1.5 Вт при 4.2 К для поддержания температуры гелия. Третья ступень предназначена только для охлаждения тоководов. Это единственный СПИН, в котором используются два тепловых экрана.

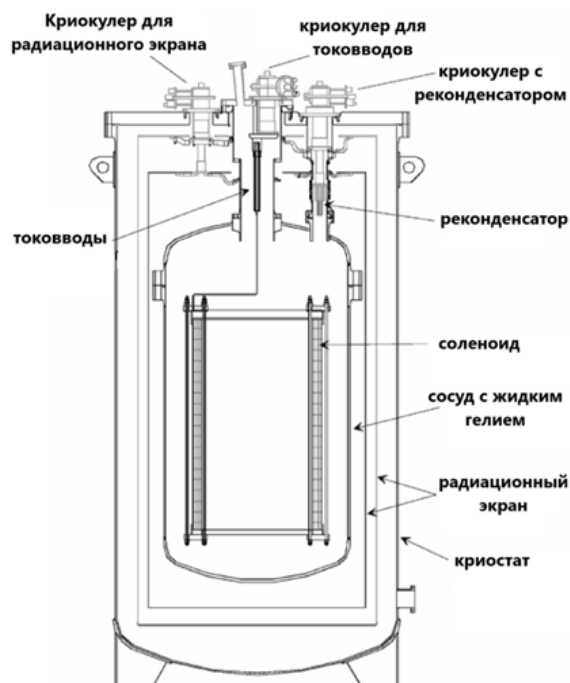


Рис. 5. Схема криогенной системы с охлаждением LHe и двумя тепловыми экранами [15].

4. Криокулерное охлаждение

4.1. Торoidalные СПИН

В работе [16] представлен СПИН энергоемкостью 2.5 МДж. Общая длина YBCO ленты шириной 12 мм, использованной в данной конструкции, составила 12 км. Магнит состоит из 56 ПК. Охлаждение осуществляется двумя ГМ (Gifford-McMahon) криокулерами. Потери переменного тока, согласно расчетам, составляют 60 Вт на одну катушку или 3.36 кВт в сумме на 56 катушек. За счет выполнения прорезей в катушке потери на одну ПК снизились до 3.3 Вт, а общие потери были снижены до 190 Вт.

В работах [17, 18] предложен дизайн мобильного сверхпроводящего накопителя энергии тороидальной конфигурации, разрабатываемый для оценки устойчивости энергетических систем. В данном тороидальном СПИН выбрана непрерывная геометрия и планируется использовать кабель Резерфорда из MgB_2 с общей длиной 4.1 км. Рассчитанная энергоемкость составляет 0.97 МДж при 20 К и 2.2 МДж при 10 К. Планируется использовать 2 криокулера.

Первый КК и первая ступень второго криокулера охлаждает тепловой экран, а вторая ступень сам соленоид. Необходимая мощность на охлаждение теплового экрана составляет 277 Вт. Необходимая мощность на охлаждение катушки СПИН при 20 К составляет 2.8 Вт, а при 10 К 3.1 Вт.

В работе [19] представлен тороидальный магнит, изготовленный с использованием 28 DPC. Он изготовлен с использованием ленты YBCO шириной 12 мм, а общая запасенная энергия составляет 2.5 МДж. Для охлаждения используются четыре двухступенчатых ГМ КК Sumitomo RDK-415D мощностью 70 Вт при 80 К на первой ступени и 18 Вт при 15 К на второй ступени. Первые ступени криокулеров охлаждают радиационную защиту и токовводы, а вторая ступень подключена к основным токоподводящим пластинам, расположенным на верхней части катушки. Для проверки системы криогенного охлаждения было проведено испытание с шестью фиктивными катушками с электронагревателями. Тепловые модели и подробное описание технических характеристик СПИН приведены в [20]. Как известно, тороидальные конструкции позволяют ускорить циклы зарядки за счет меньших потерь переменного тока. В этой статье показано, что большой тороидальный магнит также может быть охлажден кондуктивным способом с отличным тепловым градиентом.

В работе [21] была изготовлен тороидальный магнит энергоемкостью 10.3 кДж с общей длиной ленты BSSCO равной 1.8 км. Сборка состоит из 60 ПК и показана на рис. 6. Первая ступень ГМ КК Cryomech GB37 была подключена к токовводам и теплому экрану. Кроме того, тепловой экран охлаждался сосудом с LN₂, расположенным у внешней стенки вакуумной камеры. Для охлаждения магнита до 6 К с помощью первой ступени КК с возможной мощностью 1 Вт при 4 К потребовалось 88 ч.

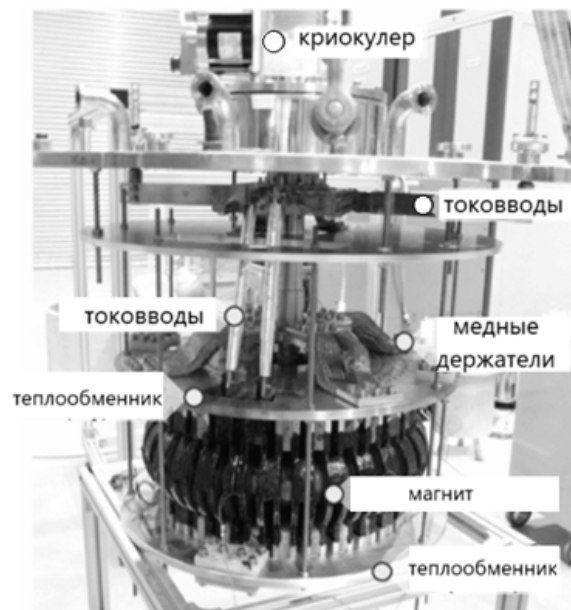


Рис. 6. Тороидальный СПИН энергоемкостью 10 кДж.

4.2. Соленоидные СПИН

В [22, 23] представлен СПИН энергоемкостью 600 кДж, разработанный в рамках национального проекта в Республике Корея. Он состоит из 22 DPC из 4-слойного проводника Bi-2223/латунь. Они охлаждаются двумя КК Sumitomo 415D мощностью 20 Вт при 20 К и 70 Вт при 80 К. Схема охлаждения представлена на рис. 7. В данных работах анализируется влияние формы охлаждающей пластины на теплоотвод. Благодаря прорезям в охлаждающих пластинах потери на вихревые токи в них снижаются с 10 кВт до 100 Вт. Распределение температуры в медной охлаждающей системе (пластинах и медных тепловых каналов) приведено в [24].

В этом СПИН также использовался LN₂, но он применялся для более быстрого охлаждения теплообменника во время начального охлаждения [25]. Соединение медных каналов непосредственно к сердцевине магнита позволяет передавать мощность охлаждения непосредственно туда, где происходит большая часть нагрева от вихревых токов. В то же время каналы вносят свой вклад в потери от вихревых токов.

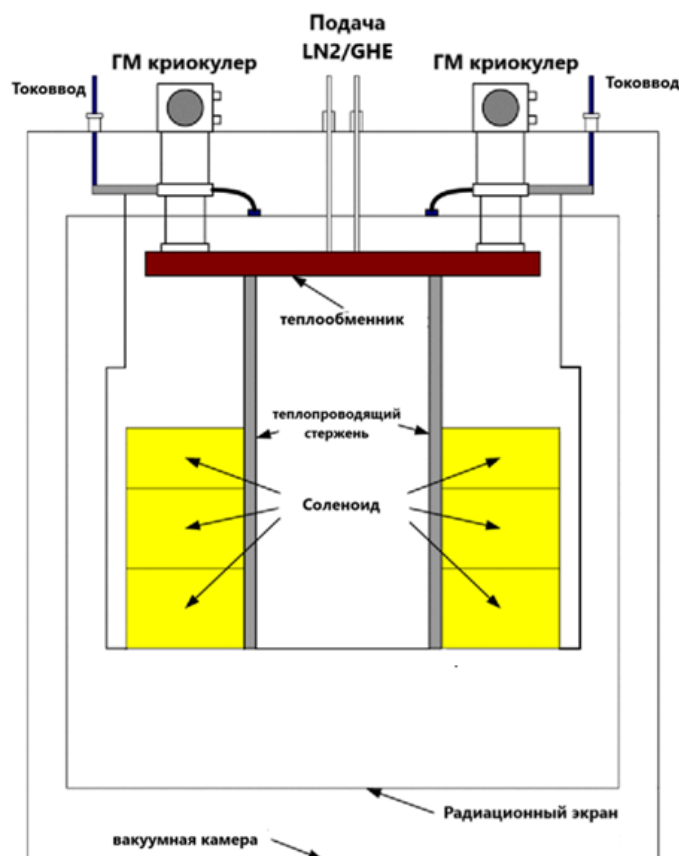


Рис. 7. Схема системы охлаждения соленоидного СПИН [24].

В [26] описан индуктивный накопитель мощностью 100 кДж/50 кВт, разработанный для интеграции в микросеть с использованием 30 уложенных РС из ленты Bi2223/Ag шириной 4.3 мм. Схема охлаждения в ней схожа с описанной выше. В работе [27] для исследования микросетей разработанный соленоидный магнит из шести YBCO ДПК. Магнит аккумулирует 2 МДж/1.6 МВт и охлаждается с помощью трех одноступенчатых ГМ КК. Ступени КК хорошо расположены и хорошо справляются с тепловыми потерями на нагрев переменным током. Тем не менее, такая конструкция отличается сравнительно высокой стоимостью и сложностью работы с большим током.

В Университете Вуллонгонга был разработан и испытан прототип магнита энергоемкостью 2.5 кДж, изготовленный из лент BSSCO-2223 [28]. Он охлаждается до 20 К с помощью газообразного гелия в холодной ступени КК Leybold 120T, подаваемого компрессором Leybold Coolpak 6000 с газообразным гелием. Кроме того, для охлаждения радиационной защиты использовался LN₂, а внутри криостата были установлены радиационные перегородки. Мощность охлаждения составляет около 38 Вт при температуре 25 К. Для обеспечения прямого теплового контакта катушка из ВТСП была помещена непосредственно на медную пластину, прикрученную к холодному пальцу КК. В ходе первого эксперимента катушка была охлаждена до 23.8 К за 17 ч. Основная проблема этой конструкции заключается в том, что, поскольку КК работает внутри магнитного поля, в медном сердечнике возникают потери переменного тока, а конструкция тоководов значительно нагревает магнит.

5. Системы охлаждения с использованием SN2

В работе [29] разработан и изготовлен магнит мощностью 4 кДж, охлаждаемый двумя ГМ КК и стабилизированный твердым азотом. В его конструкции используются изготовленные на заказ ленты REBCO шириной 4.55 мм. Общий объем соленоидного магнита разделен на шесть ДПК. LN2 подается в камеру магнита с помощью трубки и охлаждается до застывания через первую ступень модернизированного криокулера термостата Leybold (coolpower 5/100) с мощностью 100 Вт при 80 К. Второй КК - СТИ (Cryodyne 1020С), и его первая ступень мощностью 40 Вт при 80 К используется для охлаждения тоководов. Вторые ступени обоих КК подключены к магниту и должны охлаждать его ниже 30 К. Вторая ступень Cryodyne 1020С имеет мощность 7 Вт при 20 К. При типичном испытании на охлаждение камера магнита первоначально полностью заполнялась ~ 30 литрами LN2. Для охлаждения образца катушки до 20 К потребовалось около 35 ч. Фазовый переход в тройной точке азота (63.2 К при 12.5 кПа) занял около 2 ч, а фазовый переход из твердого состояния в твердое (35.6 К при 0.1 Па) — более 3 ч. Результаты не оцениваются, поскольку КК был поврежден.

В работе [30] сверхпроводящий магнит HTS работает при температуре 20 К с одним двухступенчатым криокулером ГМ для охлаждения магнита. Для получения опыта автономной работы системы ВТСП магнита, твердый азот используется для поддержания температуры магнита во время отключения КК.

Криогенная система ВТСП катушки состоит из вертикального криостата, емкости с твердым азотом, емкости с жидким азотом, тепловой защиты, тоководов и криокулера Гейгера-Мюллера. Тепловой экран с суперизоляцией подключен к первой ступени ГМ КК внутри криостата. Сосуд с жидким азотом также подключен к первой ступени КК. В этом случае тепловая защита может быть привязана к температуре жидкого азота, когда магнитная система работает в автономном режиме. На рис. 8 показана общая схема магнитной системы. Емкость с жидким азотом находится на верхней пластине теплового экрана. Хороший тепловой контакт обеспечивается болтовым креплением с верхней плитой.

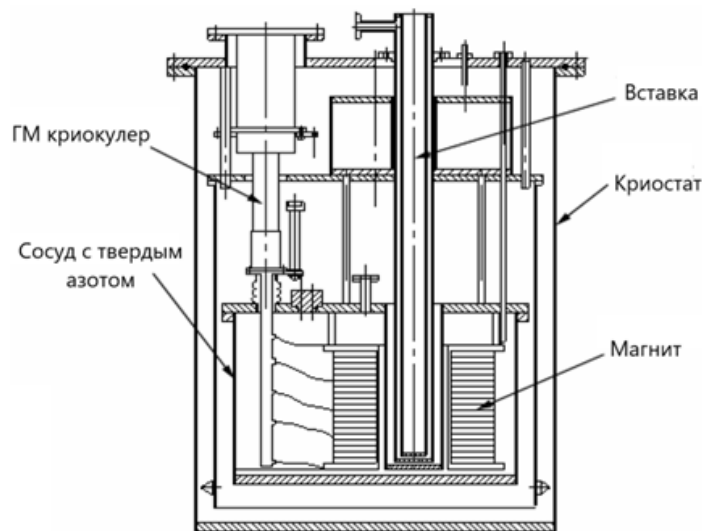


Рис. 8. Схема охлаждающей системы соленоидального СПИН [29].

6. Системы охлаждения с трубками для циркуляции газообразного или жидкого хладагента

В работе [31] для разработки системы охлаждения СПИН, использующей циркуляцию газообразного гелия, была изготовлена модель катушки YBCO, состоящая из двух сложенных друг на друга ПК. Эта система была разработана для обеспечения равномерного быстрого охлаждения катушек. Преимущество этой конструкции заключается в том, что КК можно разместить дальше от катушки, чтобы газообразный гелий циркулировал вокруг катушки, обеспе-

чивая отличный тепловой градиент. С другой стороны, требуется не менее двух компрессоров и сложнее изготовить систему трубок для охлаждающего газа.

В работах [32, 33] представлен дизайн СПИН энергоемкостью 1 МДж (рис. 9) для подавления колебаний мощности и обеспечения контролируемого высвобождения энергии сверхпроводящих магнитов в ускорителе в случае неисправности для коллайдера Nuclotron-based Ion Collider fAcility (NICA). Внешний тепловой экран в данном СПИН охлаждается ГМ КК до 80 К. Сам магнит состоит из восьми коаксиально расположенных соленоидов из CORC кабелей, которые охлаждаются протекающим жидким гелием. В работе [33] представлены результаты расчётов потерь переменного тока в катушках (потери составили 3.486 Вт за 6 циклов зарядки–разрядки), распределение температуры в СПИН а также распределение вихревых токов на тепловом экране. Более подробно конструкция самого магнита описана в работе [32].

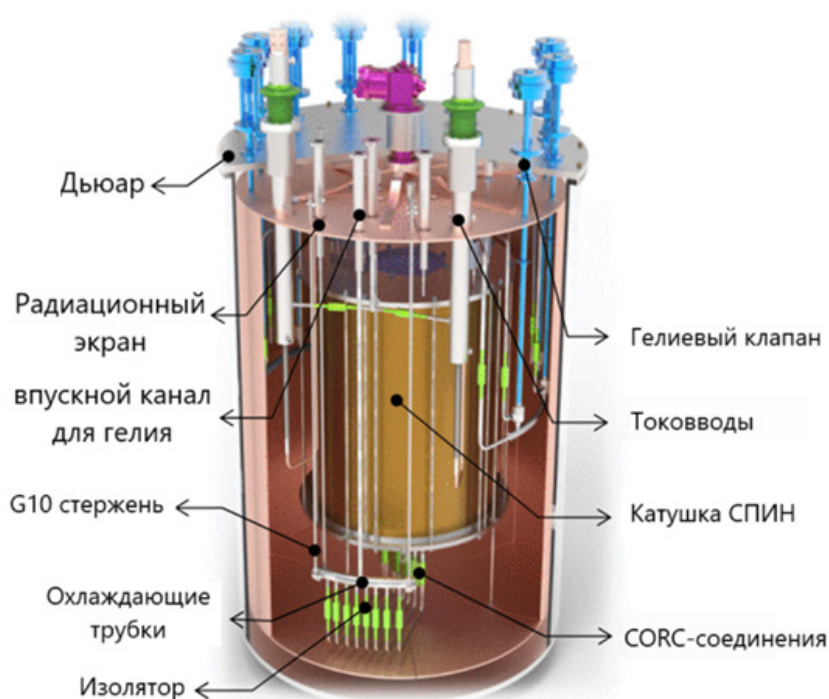


Рис. 9. Схема СПИН энергоемкостью 1 МДж [32].

В работе [34] описана конструкция и изготовление СПИН с запасенной энергией 4 кДж, охлаждаемого с помощью газообразного гелия. Катушка выполнена с использованием многожильных Bi-2223 проводов, покрытых серебряным сплавом. Для ее охлаждения в основную часть криостата с ВТСП-катушкой при контролируемых температурных условиях с помощью нагревателя подается газообразный гелий, охлаждаемый с помощью жидкого гелия. Первая ступень КК подключена к радиационной защите и поддерживает ее при температуре 80 К, а вторая ступень также используется для охлаждения магнита. Используемая система охлаждения подходит для катушек большой мощности с высокими значениями магнитного поля. Однако для работы системы необходим дополнительный терморегулятор.

7. Заключение

В последние годы высокотемпературные сверхпроводники используются для создания множества электрических устройств, таких как СПИН, электрические вращающиеся машины, системы маглев и т. д. Эти устройства сильно зависят от рабочей температуры и общей термостабильности. В данном обзоре представлены уникальные системы охлаждения СПИН,

которые были построены во всем мире. Кроме того, методы охлаждения были распределены по категориям, чтобы исследователям было проще найти публикации и выбрать схему охлаждения. Показано, что использование КК для охлаждения как магнита, так и теплового экрана является наиболее распространенным методом охлаждения СПИН благодаря простоте конструкции и безопасности эксплуатации. Магниты большого объема используют погружную схему, так как она обеспечивает им лучшую термостабильность, чем крепление на ступени КК. Были представлены схемы охлаждения, использующие SN2 для охлаждения катушки и схемы, использующие LN2 для охлаждения теплового экрана. Аналогичные системы охлаждения и конструкции используются и в других сверхпроводящих электрических устройствах, таких как трансформаторы, магниты маглев и другие, поэтому данный обзор окажется полезным и при проектировании этих устройств.

Благодарности

Работа выполнена в рамках Госзадания (проект FSWU-2022-0013) при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ

Литература

- [1] T. Kotoyori, H. Ohnishi, Y. Masui, A. Ishiyama, W. Tomonori, N. Hirano, S. Nagaya, K. Shikimachi, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **23**, 3800604 (2013). DOI: 10.1109/TASC.2013.2246831
- [2] G.A. Shneerson, K. V. Voloshin, V. V. Titkov, I. Yu. Rodin, E. R. Zapretilina, T. A. Hon, N. A. Hitrov, V. S. Ovsyannikov, A. Lantsetov, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **34**, 1 (2024). DOI: 10.1109/TASC.2024.33742
- [3] A. Morandi, M. Fabbri, B. Gholizad, F. Grilli, F. Sirois, V. M. R. Zermeño, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **26**, 1 (2016). DOI: 10.1109/TASC.2016.2535271
- [4] J.H. Choi, H.G. Cheon, J.W. Choi, H.J. Kim, K.C. Seong, S.H. Kim, *Physica C: Superconductivity and its applications* **470**, 1703 (2010). DOI: 10.1016/j.physc.2010.05.190
- [5] K. Higashikawa, T. Nakamura, H. Okamoto, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **16**, 578 (2006). DOI: 10.1109/TASC.2006.870008
- [6] S. Filippidis, A. Bouhouras, N. Poulakis, G. Christoforidis, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **31**, 1 (2021). DOI: 10.1109/TASC.2021.3109799
- [7] K.L. Kim, J.B. Song, J.H. Choi, S.H. Kim, D.Y. Koh, K.C. Seong, H.M. Chang H.G. Lee, *Superconductor Science and Technology* **23**, 125006 (2010). DOI: 10.1088/0953-2048/23/12/125006
- [8] S. Nagaya, N. Hirano, M. Naruse, T. Watanabe, T. Tamada, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **23**, 5602804 (2013). DOI: 10.1109/TASC.2012.2235751
- [9] Y. Makida, Y. Makida, T. Shintomi, T. Hamajima, N. Ota, M. Katsura, K. Ando, T. Takao, M. Tsuda, D. Miyagi, H. Tsujigami, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* **101**, 012028 (2015). DOI: 10.1088/1757-899X/101/1/012028
- [10] Y. Suzuki, S. Yoshida, and Y. Kamioka, *Cryogenics* **43**, 597 (2003). DOI: 10.1016/S0011-2275(03)00169-3
- [11] Y. Qiu, L. Ren, Y. Xu, Z. Yang, H. Li, X. Li, J. Shi, Y. Tang, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **34**, 1 (2024). DOI: 10.1109/TASC.2024.3350592
- [12] Z. Yang, L. Ren, Y. Xu, J. Shi, Y. Qiu, P. Duan, J. Fang, C. Wang, M. Song, L. Li, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **34**, 1 (2024). DOI: 10.1109/TASC.2024.3376491
- [13] H.J. Kim, K.C. Seong, J.W. Cho, J.H. Bae, K.D. Sim, S. Kim, E.Y. Lee, K. Ryu, S.H. Kim, *IEEE transactions on applied superconductivity* **16**, 574 (2006). DOI: 10.1109/TASC.2006.871329
- [14] H.-J. Kim, H.-J. Kim, K.-C. Seong, J.-W. Cho, J.-H. Bae, K.-D. Sim, K.-W. Ryu, B.-Y. Seok, S.-H. Kim, *Cryogenics* **46**, 367 (2006). DOI: 10.1016/j.cryogenics.2005.08.008
- [15] L. Ottonello, G. Canepa, P. Albertelli, E. Picco, A. Florio, G. Masciarelli, S. Rossi, L. Martini, C. Pincella, A. Mariscotti, E. Torello, A. Martinolli, M. Mariani, *IEEE transactions on applied*

- superconductivity **16**, 602 (2006). DOI: 10.1109/TASC.2005.869677
- [16] S. Lee, S.-H. Park, W.-S. Kim, J.-K. Lee, S. Lee, C. Park, J.-H. Bae, S.-H. Kim, K.-C. Seong, K. Choi, S. Hahn, IEEE transactions on applied superconductivity **21**, 1354 (2011). DOI: 10.1109/TASC.2011.2104931
- [17] S. Nomura, H. Kamada, H. Xu, T. Nitta, T. Shintomi, N. Hirano, IEEE Transactions on Applied Superconductivity **32**, 1 (2022). DOI: 10.1109/TASC.2022.3181538
- [18] S. Nomura, T. Nitta, T. Shintomi, IEEE Transactions on Applied Superconductivity **30**, 1 (2020). DOI: 10.1109/TASC.2020.2982877
- [19] H. Yeom, Y. J. Hong, H. B. Kim, D. Y. Koh, J. S. Ko, S. J. Park, IEEE transactions on applied superconductivity **23**, 5700604 (2013). DOI: 10.1109/TASC.2013.2238287
- [20] H.K. Yeom, D.Y. Koh, J.S. Ko, H.B. Kim, Y.J. Hong, S.H. Kim, K.C. Seong, Physica C: Superconductivity and its Applications **471**, 1390 (2011). DOI: 10.1016/j.physc.2011.05.201
- [21] W.S. Kim, S.-Y. Kwak, J.-K. Lee, K.-D. Choi, H.-K. Jung, K.-C. Seong, S. Hahn, IEEE transactions on applied superconductivity **16**, 620 (2006). DOI: 10.1109/TASC.2005.864244
- [22] W.-S. Kim; S.-Y. Kwak; J.-K. Lee; K.-D. Choi; H.-K. Jung; K.-C. Seong, S. Hahn, IEEE transactions on applied superconductivity **16** (2006). DOI: 10.1109/TASC.2005.864244
- [23] M.J. Park, S.Y. Kwak, S.Y. Lee, W.S. Kim, J.K. Lee, C. Park, K. Choi, J.H. Bae, S.H. Kim, K.D. Sim, K.C. Seong, H.K. Jung, S. Hahn, Physica C: Superconductivity **468**, 2096 (2008). DOI: 10.1016/j.physc.2008.05.253
- [24] Y.-J. Hong, H.-K. Yeom, S.-J. Park, S.-H. Kim, Y.-D. Choi, IEEE transactions on applied superconductivity **18**, 745 (2008). DOI: 10.1109/TASC.2008.922237
- [25] H.K. Yeom, et al., IEEE transactions on applied superconductivity **18**, 741, 2008, DOI: 10.1109/TASC.2008.921217
- [26] M. Song, et al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity **25**, 1, 2014, DOI: 10.1109/TASC.2014.2386345
- [27] Y. Xu, Y. Li, L. Ren, C. Xu, Y. Tang, J. Li, L. Chen, B. Jia, IEEE Transactions on Applied Superconductivity **28**, 1 (2018). DOI: 10.1109/TASC.2018.2808454
- [28] C.J. Hawley, S.A. Gower, IEEE transactions on applied superconductivity **15**, 1899 (2005). DOI: 10.1109/TASC.2005.849328
- [29] Y. Li, et al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity **28**, 1, 2018, DOI: 10.1109/TASC.2018.2814960
- [30] Q. Wang, Y. Li, P. Song, H. Wen, Y. Bai, L. Yan, K. Kim, IEEE Transactions on Applied Superconductivity **18**, 754 (2008). DOI: 10.1109/TASC.2008.922273
- [31] S. Nagaya, N. Hirano. M. Naruse, T. Watanabe, T. Tamada, IEEE transactions on applied superconductivity **23**, 5602804 (2012). DOI: 10.1109/TASC.2012.2235751
- [32] M. Li, J. Zheng, H. Khodzhbagiyani, T. Ma, X. Huang, M. Novikov, Y. Cheng, IEEE Transactions on Applied Superconductivity **34**, 1 (2024). DOI: 10.1109/TASC.2023.3346831
- [33] J. Zheng, Y. Cheng, M. Li, H. Khodzhbagiyani, S. Dai, M. Novikov, IEEE Transactions on Applied Superconductivity **34**, 1 (2024). DOI: 10.1109/TASC.2024.3446286
- [34] H. Hayashi, H. Kimura, Y. Hatabe, K. Tsutsumi, A. Tomioka, T. Bohno, S. Nose, Y. Yagi, T. Ishii, M. Iwakuma, K. Funaki, IEEE transactions on applied superconductivity **13**, 1867 (2003). DOI: 10.1109/TASC.2003.812932

A review of cooling systems for superconducting energy storage devices

D. A. Aleksandrov^{1,*}, S. V. Pokrovskii¹

¹ NRNU MEPhI, Kashirskoye Highway, 31, 115409 Moscow, Russian Federation

* e-mail: dimax.2001@mail.ru

Here is the abstract of the paper: Superconducting magnetic energy storage (SMES) is a promising high-efficiency energy storage device. SMES devices are used in various applications such as microgrids, hybrid electric vehicles, renewable energy sources, and others. For stable and efficient operation of SMES, a well-designed cooling system is required, by which higher critical currents and lower AC losses can be achieved. In this review, various SMES designs are presented, sorted by type of cooling system.

Keywords: SMES; HTS; cryocooler; solenoid.



Дмитрий Александрович Александров — инженер-исследователь лаборатории НИЛ СЭС, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ).

Dmitrii A. Aleksandrov – research engineer at Superconducting Energy Systems laboratory, National research nuclear university «МЕРНИ».



Сергей Владимирович Покровский — доц., к. ф.-м. н., зав. лабораторией НИЛ СЭС, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ).

Sergey V. Pokrovskii — Ph.D; Assoc. Prof.; head of Superconducting Energy Systems laboratory, National research nuclear university «МЕРНИ».