

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)
Факультет «Энергетический»
Кафедра «Электростанции сети и системы»

РЕФЕРАТ

группа Э-441


Зарудная Анастасия Павловна



на тему: «Передовые мировые решения в области внедрения в электроэнергетике технологий сверхпроводниковых элементов»

Научный руководитель: к.т.н., доцент кафедры ЭССиС

Коровин Юрий Витальевич



16.11.2015

АННОТАЦИЯ

Зарудная А.П. Передовые мировые решения в области внедрения в электроэнергетике технологий сверхпроводниковых элементов. – Челябинск: ЮУрГУ, Э-441, 40 с., 12 ил., 1 табл.

Тема реферата: «Передовые мировые решения в области внедрения в электроэнергетике технологий сверхпроводниковых элементов». Данная работа содержит основные этапы истории открытия и исследования свойств явления сверхпроводимости и то, какие исследования ведутся в настоящее время для расширения сфер использования полезных свойств данного явления. Перечислены основные проблемы, с которыми сталкивается электроэнергетика, то, как их можно решить посредством сверхпроводимости. Приводятся возможные пути использования явления и основные технические решения, практикуемые в разных странах. Сделаны выводы о целесообразности использования сверхпроводимости. В ходе работы использовались источники, представленные в библиографическом списке.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Тема: «Передовые мировые решения в области внедрения в электроэнергетике технологий сверхпроводниковых элементов»

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ПОНЯТИЕ СВЕХПРОВОДИМОСТИ	
История сверхпроводимости.....	6
Объяснение сверхпроводимости	13
Сверхпроводники I и II рода	14
ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СВЕХПРОВОДИМОСТИ.....	16
Магниты	16
Сверхпроводящие НТСП-провода	18
Сверхпроводящие ВТСП-провода.....	20
ЭНЕРГЕТИКА	22
Кабели.....	22
Сверхпроводящие машины	27
Сверхпроводящие трансформаторы.....	28
Ограничители токов короткого замыкания	32
Накопители энергии.....	34
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	37
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	39

ВВЕДЕНИЕ

«...Наши научно-исследовательские и производственные организации будут нацелены на внедрение инновационных технологий, таких, как разработки с применением эффекта сверхпроводимости, особо актуального для наших протяженных территорий. Мы продолжаем терять гигантские объемы энергии при передаче ее по территории страны, гигантские объемы. В будущем именно технология сверхпроводимости кардинально изменит всю сферу производства, передачи и использования электроэнергии...»

Из послания Президента России Дмитрия Медведева
Федеральному Собранию Российской Федерации
12 ноября 2009 года

Важнейшей задачей, стоящей перед энергетикой, является создание эффективных и энергосберегающих систем передачи энергии.

Сверхпроводимость – свойство, которое проявляется у некоторых материалов в виде резкого падения удельного электрического сопротивления вплоть до нуля при температуре ниже определённого значения. Выгода от широкого использования явления сверхпроводимости очевидна: радикальное снижение потерь электроэнергии при ее выработке и передаче, уменьшение в разы размеров генерирующего оборудования и двигателей, создание новых электронных приборов, разработка сверхмощных электромагнитов для научных исследований и промышленности, разработка новых направлений в медицине, использование эффекта левитации на железной дороге.

Появление высокотемпературных сверхпроводящих материалов с высокими токонесущими характеристиками создало принципиально новые возможности для практического использования этого явления.

Распространению сверхпроводимости также способствуют жесткие ограничения на выбросы парниковых газов, установленные Киотским протоколом. Эту задачу можно было бы выполнить при широком

применении сверхпроводимости на электростанциях и в системах передачи и распределения энергии, что дало бы возможность снизить количество сжигаемого топлива, не уменьшив выработку электроэнергии.

Однако не так-то просто заменить все провода на сверхпроводящие. Самая главная трудность — нужны низкие температуры. Подбираться к абсолютному нулю температур непросто и недешево, поэтому большое внимание уделялось и уделяется повышению критической температуры сверхпроводимости. Еще одним препятствием является сложность соответствующей аппаратуры, поскольку необходимо обеспечить равномерное охлаждение сверхпроводников и изолирование от окружающей среды. Поэтому для ее создания и обслуживания требуются развитая технология и высокая квалификация.

Таким образом, работа по созданию сверхпроводниковых машин и устройств признана актуальной во всем мире, поскольку она позволяет решить коренные проблемы передачи больших потоков электроэнергии и энергосбережения.

ПОНЯТИЕ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ

История сверхпроводимости

В 1911 году голландский ученый Гейке Камерлинг-Оннес, измеряя сопротивление ртути при низких температурах, обнаружил резкое падение его сопротивления до нуля при абсолютной температуре 4,2 К. Последующие, более аккуратные измерения показали, что температура перехода равна 4,15 К. Открытое явление было названо *сверхпроводимостью*, а температура T_C , ниже которой наблюдается переход вещества в сверхпроводящее состояние, *критической температурой*.

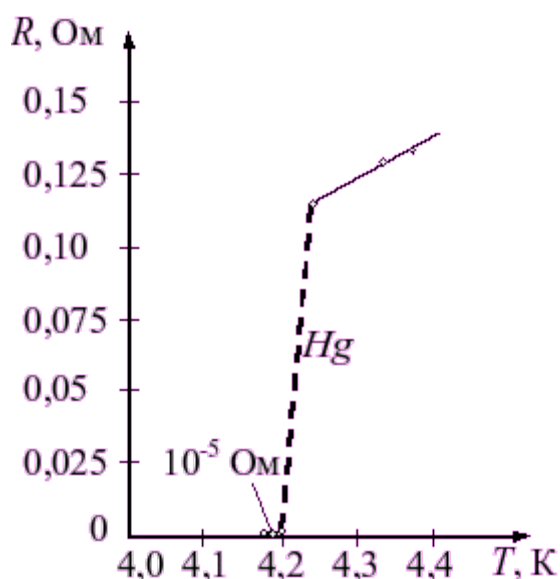


Рисунок 1 – Зависимость сопротивления ртути от температуры, полученная Камерлинг-Оннесом в 1911 г.

Существенно, что сопротивление с уменьшением температуры исчезало не постепенно, а скачком. Это означало, что образец перешел в какое-то новое, до тех пор неизвестное состояние.

Открытие сверхпроводимости оказалось возможным лишь благодаря выдающемуся техническому достижению – ожижению гелия. При атмосферном давлении гелий кипит при температуре всего на 4,2 К выше абсолютного нуля. Не случайно, что именно Камерлинг-Оннес, впервые в 1908 г. получивший жидкий гелий, открыл сверхпроводимость – для этого были необходимы исключительно низкие температуры.

Камерлинг-Оннес в апреле-июне 1914 г. установил, что ток, возбужденный однажды в замкнутом сверхпроводящем контуре, практически не ослабевает со временем. По измерению тока, наведенного в колечке из сверхпроводника, установлено, что в сверхпроводящем состоянии удельное сопротивление по крайней мере меньше 10^{-23} Ом·см, то есть в 10^{17} раз меньше сопротивления меди при комнатной температуре. Время, требуемое для затухания тока, наведенного в таком сверхпроводящем колечке, составляет не менее 100 000 лет. Таким образом, в случае сверхпроводящего тока мы фактически сталкиваемся с движением без сопротивления – с бесконечной проводимостью, что и оправдывает название явления.

Очень скоро после открытия сверхпроводимости было обнаружено, что ее можно разрушить не только нагреванием образца, но и помещением его в магнитное поле с напряженностью $H > H_C$. Поле H_C назвали *критическим*.

Важным этапом в исследовании сверхпроводимости явился 1933 г., когда В. Мейсснером и Р. Оксенфельдом было впервые установлено, что при температуре ниже критической магнитное поле полностью выталкивается из сверхпроводника. Это явление назвали эффектом Мейсснера.

Физически эффект Мейсснера означает, что у сверхпроводника, помещенного в не очень сильное магнитное поле, в поверхностном слое наводятся незатухающие круговые токи, которые в точности компенсируют внешнее приложенное поле. Может показаться, что это эквивалентно токам Фуко, возникающим в металле (в данном случае с идеальной проводимостью) при переменном внешнем поле. Однако Мейсснер и Оксенфельд обнаружили не только отсутствие проникновения магнитного поля в сверхпроводник, но и «выталкивание» поля из первоначально нормального образца, когда он охлаждался ниже температуры T_C . Если охладить кольцо до температуры ниже критической, а затем поместить его в магнитное поле, то магнитная индукция будет отсутствовать как в толще кольца, так и внутри него, а по наружной поверхности будут течь токи.

Иначе будет обстоять дело, если вначале включить поле, а затем понизить температуру. Магнитный поток через отверстие в кольце будет сохраняться, но в самом кольце $B = 0$. Поэтому возникают токи, текущие в противоположных направлениях на внешней и внутренней поверхностях кольца, как это показано на рис. 2.

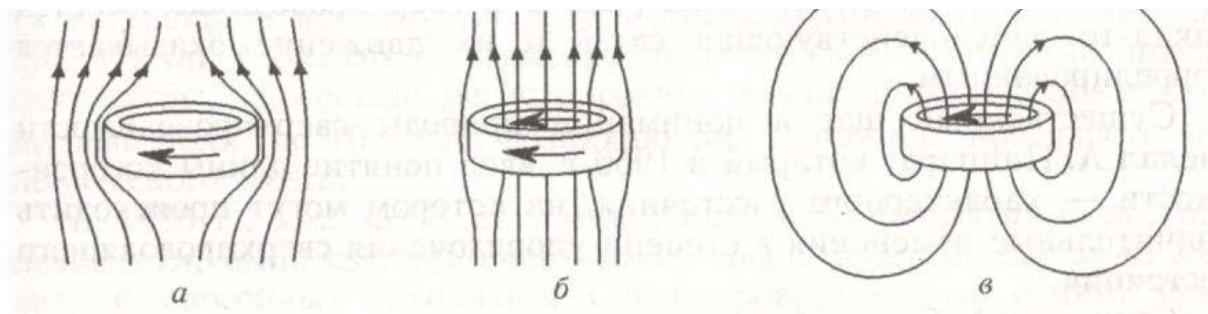


Рисунок 2- Эффект Мейсснера в сверхпроводящем кольце: а – магнитное поле включено после охлаждения кольца в нулевом поле до $T < T_C$; б – кольцо охлаждено в магнитном поле; в – поле выключено, магнитный поток оказался «замороженным» в кольце

Такое распределение токов экранирует внутренность вещества кольца от магнитного поля, но оставляет поле в полости кольца неизменным и равным приложенному полю. Если выключить внешнее поле, то ток на внешней поверхности почти полностью исчезнет и останется только ток, текущий по внутренней поверхности. Это означает, что останется и «замороженный» («захваченный») магнитный поток.

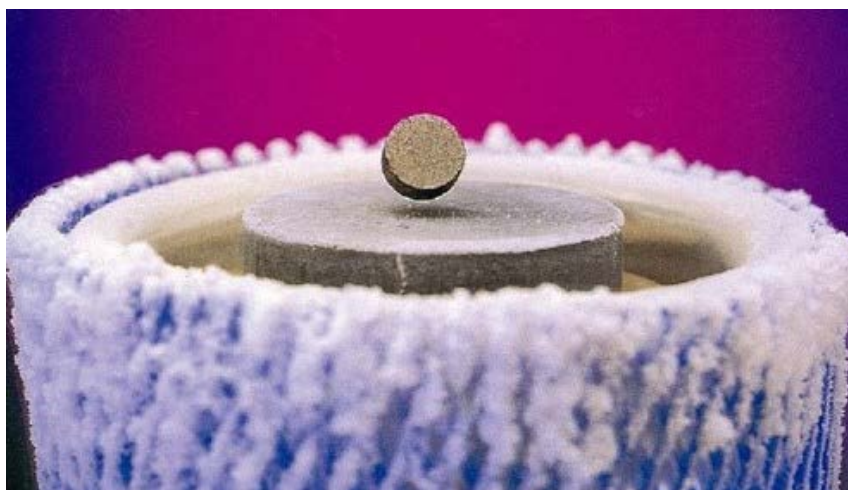


Рисунок 3 – Левитация магнита над сверхпроводником в жидком азоте.

Эффект Мейсснера

Итак, сверхпроводящее тело обладает свойствами, как бы обратными ферромагнитному: железный магнит концентрирует силовые линии магнитного поля, а сверхпроводник выталкивает их. Об эффекте Мейсснера принято говорить как об идеальном диамагнетизме.

В 1935 г. братья Г. Лондон и Ф. Лондон теоретически установили связь плотности тока с магнитным полем в сверхпроводнике, что стало основой для дальнейшего развития электродинамики сверхпроводников. Это была теория, из которой следовали основные свойства сверхпроводников: абсолютный диамагнетизм и отсутствие сопротивления постоянному току. Но вопрос о микроскопическом механизме сверхпроводимости оставался открытым. Физик теоретик Фриц Лондон первый указал, что для объяснения эффекта Мейсснера и существования постоянных сохраняющихся токов в сверхпроводящих кольцах необходимо предположить, что между электронами в сверхпроводнике имеется какая-то дальнедействующая связь и их движение оказывается коррелированным.

Существенный шаг в понимании природы сверхпроводимости сделал А. Пиппард, который в 1950 г. ввел понятие длины когерентности – характерного расстояния, на котором могут происходить значительные изменения в степени упорядочения сверхпроводящего состояния.

Следующий большой вклад в теорию сверхпроводимости внесли в 1950 г. В. Л. Гинзбург и Л. Д. Ландау. Это был подход, построенный на теории фазовых переходов, учитывающий квантовость явления. В 1937 г. А. А. Абрикосов на основе теории Гинзбурга - Ландау построил теорию так называемых сверхпроводников II рода. Тем самым было объяснено обнаруженное в сверхпроводящих сплавах еще в 1937 г. Л. Б. Шубниковым явление частичного проникновения магнитного потока в образец, сопротивление которого остается равным нулю.

Механизм явления сверхпроводимости стал понятен лишь в 1957 г. после теоретических работ американских ученых Дж. Бардина, Л. Купера и Дж. Шриффера (теория БКШ), а также советского ученого Н. Н. Боголюбова.

Теория БКШ содержит новое принципиальное утверждение: электроны в сверхпроводнике образуют за счет обмена фононами связанные пары – происходит так называемое куперовское спаривание. Развитие теории дало возможность не только описать основные экспериментальные данные в физике сверхпроводников, но и предсказать много новых эффектов.

В 1962 г. Б. Джозефсон теоретически предсказал ряд необычных эффектов при прохождении куперовских пар через туннельный контакт между двумя сверхпроводниками, что открыло новую главу в изучении сверхпроводимости – главу «слабой сверхпроводимости».

Наряду с мощным прорывом в области теории к середине 60-х было создано много новых сверхпроводящих материалов, важных с практической точки зрения. Использование этих материалов позволило, в частности, получить как сверхсильные магнитные поля, так и разработать высокочувствительные квантовые интерферометры, способные регистрировать фантастически слабые магнитные поля, возникающие, например, при работе человеческого мозга.

К 1986 г., то есть за 75 лет, минувших после открытия сверхпроводимости, было сделано очень много. Было известно около 40 металлов, способных находиться в сверхпроводящем состоянии. Критические температуры этих металлов лежат в пределах от 0,012 К у вольфрама до 11,3 К у технеция. Помимо чистых металлов, насчитывалось несколько сотен сверхпроводящих соединений и сплавов. Часто ни один из компонентов этих соединений не является сверхпроводящим, например CoSi_2 , CuS . Среди соединений находятся и вещества с наивысшей (до 1986 г.) критической температурой. Это Nb_3Ge , Nb_3Sn , V_3Si , которые переходят в сверхпроводящее состояние, соответственно, при 23,2, 18 и 17 К.

Если проанализировать развитие исследований сверхпроводимости, то отчетливо видна следующая тенденция: вначале изучалась сверхпроводимость простых металлов (Hg , Pb , Nb), затем двойных (Nb_3Sn , Nb_3Ge) и тройных ($\text{Nb}_3(\text{Al}, \text{Ge})$) интерметаллидов. У рекордсмена (соединения

Nb_3Ge) величина T_C составляла 23,2 К (табл. 1). Температурный интервал существования сверхпроводимости лишь приблизился к температурам кипения жидкого водорода и неона, и фактически для перевода материалов в сверхпроводящее состояние использовался дорогостоящий и технически трудный в эксплуатации хладагент – жидкий гелий. Заветным пределом по T_C являлась температура кипения жидкого азота (77 К) – дешевого и доступного хладагента, производимого промышленностью в больших количествах.

Таблица 1 – Критические температуры и поля разных веществ

Материалы	Критическая температура, К	Критические поля (при 0 К), Гс	
Сверхпроводники I рода			
Родий	0,000325	0,049	
Титан	0,39	60	
Цинк	0,85	55	
Таллий	2,37	180	
Олово	3,72	305	
Ртуть	4,15	411	
Свинец	7,19	803	
Сверхпроводники II рода			
		H_{C1}	H_{C2}
Ниобий	9,25	1735	4040
Nb_3Sn	18,1	–	220000
Nb_3Ge	23,2	–	400000

В исследовании металлооксидных сверхпроводников и поиск новых сверхпроводящих материалов этого типа включилась вся мировая общественность. В 1987 г. на керамике Y-Ba-Cu-O была достигнута температура сверхпроводящего перехода 92 К, и, тем самым, был преодолен азотный барьер, что еще сильнее подхлестнуло массовый интерес исследователей к новым высокотемпературным сверхпроводникам. Затем температура сверхпроводящего перехода была поднята до 125 К в соединениях таллия. Регулярно стали появляться сенсационные заявления о сверхпроводимости при комнатных температурах, но они быстро

«закрывались». К настоящему времени рекорд критической температуры принадлежит ртутным соединениям с $T_c \approx 140$ К [1, 6-12].

В 2003 году академик В. Л. Гинзбург, получивший Нобелевскую премию за свой вклад в теорию сверхпроводимости, призвал научный мир к скорейшему решению проблемы комнатно-температурной сверхпроводимости (КТСП): «...Разумеется, сегодня наиболее актуальными проблемами в области сверхпроводимости являются выяснение механизма и ряда особенностей высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) и создание КТСП. Точнее в последнем случае нужно выяснить возможности и условия создания КТСП – комнатно-температурных проводников...» [2, 13].

Математическая модель процесса и теория сверхпроводимости в КТСП были созданы и опубликованы в 2007 году. Они были примечательны тем, что учитывали релятивистские свойства электронов, экспериментально установленные в графене нашими соотечественниками, лауреатами Нобелевской премии по физике 2010 г. К. Новоселовым и А. Геймом.

Для обобщения ранее полученных результатов по НТСП (низкотемпературная сверхпроводимость) и ВТСП (высокотемпературная сверхпроводимость) были применены искусственные нейронные сети. В результате были определены электронная плотность и вероятный размер частицы, ответственной за сверхпроводимость. Правильность разработанного метода проверена на экспериментальных данных потенциалов ионизации и размеров атомов химических элементов, комплексных экспериментальных характеристик молекулярной связи (размеров молекулы, энергии диссоциации, потенциалов ионизации), а также на экспериментальных данных по критической температуре НТСП и ВТСП [3, 17].

Главная цель исследователей природы сверхпроводимости на сегодняшний день – открыть такой материал, который сохранял бы свои сверхпроводящие свойства при комнатной температуре. Этот материал мог бы избавить всю технику, использующую явление сверхпроводимости, от ее главного недостатка – необходимости постоянного охлаждения проводника с

помощью громоздких и дорогих криогенных установок на жидком азоте. Данная разработка является наиболее перспективной и масштабной из известных проектов, способных существенно повлиять на все сферы жизни.

Объяснение сверхпроводимости

Квантово-механическая теория явления сверхпроводимости рассматривает его как сверхтекучесть электронов в металле с присущим сверхтекучести отсутствием трения. Электроны проводимости движутся в сверхпроводнике без «трения» о неоднородности кристаллической решетки. Основная особенность сверхпроводников заключается в том, что в них возникает взаимное притяжение электронов с образованием электронных пар, так называемых куперовских пар. Причиной этого притяжения является дополнительное к кулоновскому отталкиванию взаимодействие между электронами, осуществляемое под воздействием кристаллической решетки и приводящее к притяжению электронов.

В квантовой теории металлов притяжение между электронами (обмен фононами) связывается с возникновением элементарных возбуждений кристаллической решётки. Электрон, движущийся в кристалле и взаимодействующий с другим электроном посредством решётки, переводит ее в возбужденное состояние. При переходе решётки в основное состояние излучается квант энергии звуковой частоты — фонон, который поглощается другим электроном. Притяжение между электронами можно представить как обмен электронами фононами, причём притяжение наиболее эффективно, если импульсы взаимодействующих электронов антипараллельны.

Возникновение сверхпроводящего состояния вещества связано с возможностью образования в нем связанных пар электронов. Электроны, образующие пару, находятся друг от друга на расстояниях порядка ста периодов кристаллической решётки. Вся электронная система сверхпроводника представляет собой сплоченное образование, простирающееся на громадные по атомным масштабам расстояния.

Если при сколь угодно низких температурах кулоновское отталкивание между электронами преобладает над притяжением, образующим пары, то вещество сохраняет обычные свойства. Если же при температуре T_C силы притяжения преобладают над силами отталкивания, то вещество переходит в сверхпроводящее состояние.

Важнейшей особенностью связанного в пары коллектива электронов в сверхпроводнике является невозможность обмена энергией между электронами и решеткой малыми порциями, меньшими чем энергия связи пары электронов. Это означает, что при соударении электронов с узлами кристаллической решётки не изменяется энергия электронов и вещество ведёт себя как сверхпроводник с нулевым удельным сопротивлением. Квантово-механическое рассмотрение показывает, что при этом не происходит рассеяние электронных волн на тепловых колебаниях решётки или примесях. А это и означает отсутствие электрического сопротивления.

Для того чтобы разрушить состояние сверхпроводимости, необходима затрата определенной энергии. При температуре T_C происходит нарушение связанных состояний электронных пар, прекращается притяжение между электронами и явление сверхпроводимости перестаёт существовать [4].

Сверхпроводники I и II рода

По своему поведению в магнитных полях сверхпроводники разделяются на сверхпроводники I и II рода.

Сверхпроводники I рода вытесняют магнитное поле и способны «бороться» против него, пока его напряженность не достигла критического значения H_C . Выше этого предела вещество переходит в нормальное состояние. В промежуточном состоянии образец как бы впускает в себя магнитное поле, однако с точки зрения физики точнее сказать, что образец просто разбивается на «большие» соседствующие куски — нормальные и сверхпроводящие. Через нормальные «протекает» магнитное поле напряженностью H_C , а в сверхпроводящих, как и положено, магнитное поле

равно нулю. Сверхпроводники II рода также вытесняют магнитное поле, но только очень слабое.

При повышении напряженности магнитного поля сверхпроводник II рода «находит возможность» впустить поле внутрь, одновременно сохраняя сверхпроводимость. Это происходит при напряженности поля, намного меньшей H_C : в сверхпроводнике самопроизвольно зарождаются вихревые токи [5].

Усилия ученых мира сосредоточены в основном на исследованиях сверхпроводников II рода, так как их природа изучена гораздо хуже и именно их применение обещает наибольшие выгоды.

Выводы по главе:

1) На протяжении XX – начала XXI века учеными разных стран был накоплен большой объем знаний по сверхпроводимости.

2) К настоящему времени рекорд критической температуры принадлежит ртутным соединениям и составляет 140 К.

3) Наши соотечественники, лауреаты Нобелевской премии по физике разных лет Л. Д. Ландау, Г. В. Гинзбург, А. А. Абрикосов, А. Гейм, внесли существенный вклад в развитие теории и математического моделирования сверхпроводимости.

4) Основной особенностью сверхпроводников является образование при температуре ниже критической куперовских пар, то есть электронных пар из-за взаимного притяжения электронов, осуществляемого под воздействием кристаллической решетки. При соединении связанных в пары электронов с узлами решетки не происходит рассеяния электронных волн, а это и означает отсутствие сопротивления.

5) В настоящее время основные усилия ученых направлены на исследование сверхпроводников II рода, которые изучены хуже, а их применение наиболее перспективно.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ

Знакомство со свойствами сверхпроводящих материалов сразу вызывает мысль о необходимости их применения на практике. Это явление все чаще используется в современной электронике, энергетике, промышленности и медицине.

Выделяют три больших области использования сверхпроводников:

- 1) различные материалы: пленочные проводники, сверхпроводящие магниты и прочее;
- 2) микротехника: микроволновые устройства, сверхчувствительные системы обнаружения магнитных полей (SQUID), цифровая электроника, искусственные биологические системы;
- 3) макротехника: силовые кабели, электрические системы и сети, генераторы и двигатели [6].

Магниты

О постоянных (природных) магнитах человечеству известно достаточно давно, однако для большинства практических применений они непригодны. Напряженность их магнитного поля не очень велика и может изменяться во времени из-за воздействия внешних условий. Поэтому для получения магнитных полей используются электромагниты.

Самые первые модели электромагнитов относятся к 1820-м гг.. Они обычно состоят из сердечника и намотанного на него провода. Создаваемое при этом в обмотке магнитное поле пропорционально силе тока и количеству витков. Создание магнитов со всё большими напряженностями магнитного поля сопровождалось увеличением силы тока и потерь энергии на теплоту. Уже в 1930-е гг. для создаваемых крупных магнитов потребовалось водяное охлаждение, а получение напряженностей в десятки тысяч эрстед стало невозможным без использования сверхпроводимости [5].

Сейчас в мире серийно производятся различные виды сверхпроводящих магнитов. Велико разнообразие магнитов, которые изготавливаются для специальных, часто уникальных установок научного и промышленного назначения. Примеры представлены на рис. 4, 5.

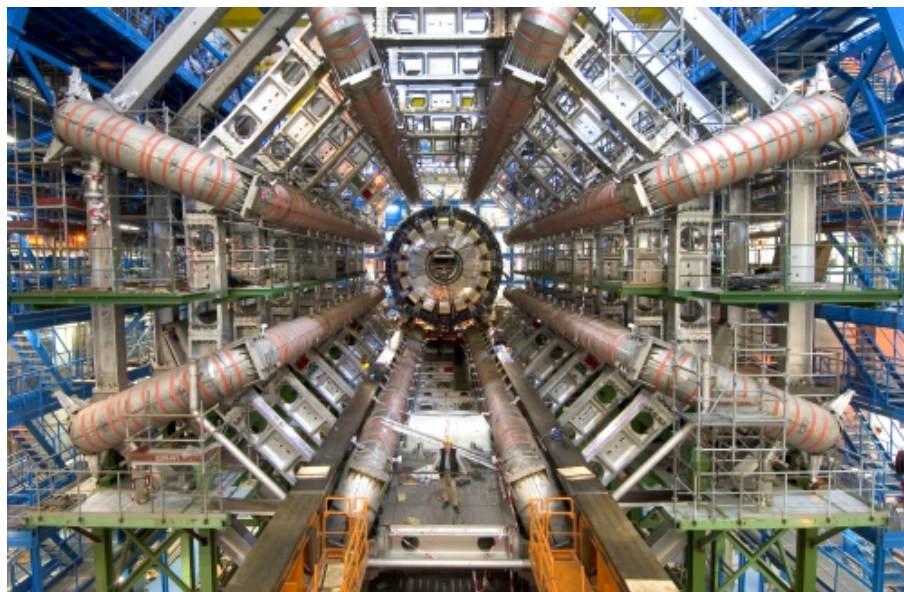


Рисунок 4 – Самый большой сверхпроводящий магнит в мире – внешний вид центрального тороида детектора ATLAS Большого адронного коллайдера [7]

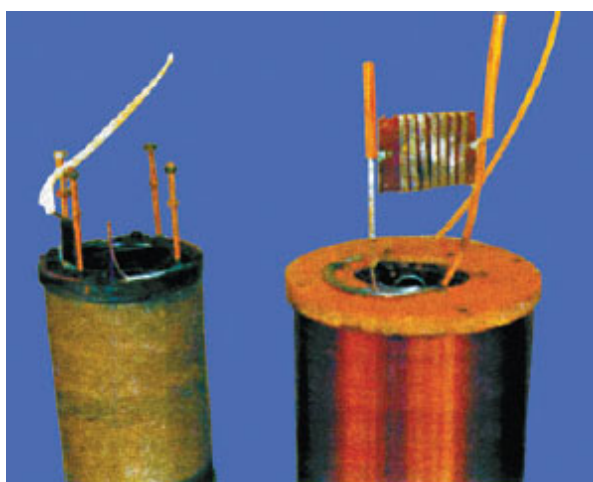


Рисунок 5 – Лабораторные сверхпроводящие соленоиды

Путь к созданию сверхпроводящих магнитов был достаточно сложным. Первоначально главным препятствием выступали низкие критические поля сверхпроводников I рода. С открытием сверхпроводников II рода начались практические попытки создания сверхпроводящих магнитов. При этом

инженеры столкнулись с различного рода неустойчивостями сверхпроводящих магнитных систем.

Примером такой неустойчивости может служить следующий опыт. Сверхпроводящий магнит располагается в сосуде с жидким гелием. Через специальный канал в сосуд вводятся провода, по которым получает питание обмотка магнита. По этому же каналу выходят пары испаряющегося гелия и подается жидкий гелий для компенсации испарения. По случайной причине в какой-то небольшой зоне обмотки сверхпроводник может перейти в нормальное состояние. Этот кусочек провода уже обладает сопротивлением, на нем начинает выделяться теплота, и он становится интенсивным нагревателем. Выделение теплоты приводит к переходу в нормальное состояние соседних участков провода, сопротивление и потери еще больше увеличиваются, и процесс развивается лавинообразно. Запасенная энергия магнита превращается в теплоту и не только испаряет весь жидкий гелий, но и разрушает обмотку.

Для стабилизации сверхпроводящих магнитов были созданы условия для саморассасывания случайно возникающих нормальных зон: сверхпроводник покрывается слоем хорошо проводящего металла, чаще всего меди, теплопроводность которой гораздо больше, а удельное сопротивление гораздо меньше, чем у СП материала в нормальном состоянии. Медь шунтирует участки, на которых произошел переход в нормальное состояние, и способствует отводу теплоты [5].

Сверхпроводящие НТСП-провода

Сверхпроводящие провода разительно отличаются от тех, что применяются в электрических бытовых устройствах.

Со сверхпроводящим материалом надо обращаться гораздо аккуратнее, так как большинство сверхпроводников хрупкие; среди НТСП-проводов исключением являются ниобий-титановые сплавы, которые обладают

достаточной для изготовления проводов пластичностью. Провода из него чаще всего используются на практике и производятся в ряде стран серийно.

При конструировании ВТСП-проводов необходимо совместить противоречивые требования: для обеспечения стабильности желательно добавлять в провод побольше меди. Но тогда увеличивается его масса и уменьшается средняя плотность тока. Низкое удельное сопротивление меди способствует подавлению неустойчивостей, но увеличивает потери в переменном магнитном поле.

Сверхпроводящие жилки провода, имеющие диаметр менее 0,1 мм, располагаются в медной матрице, их скручивают относительно продольной оси провода. На рис. 6 представлены не просто сечения различных проводов, а разные фазы «сборки» сверхпроводящего провода.

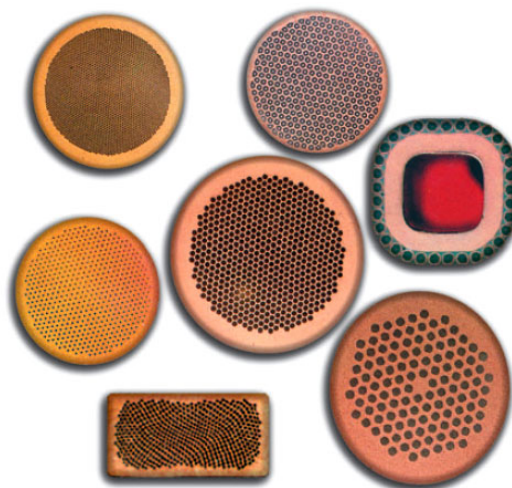


Рисунок 6 - Сечения промышленных сверхпроводящих проводов на различных этапах их «сборки»

Пучок тоненьких сверхпроводящих жилок покрывается медью и скручивается, затем эта операция проделывается с полученными более толстыми жилками и т.д. Общее число собственно сверхпроводящих ниточек в сечении провода достигает десятков и сотен тысяч [5].

Таким образом, сверхпроводящий провод — весьма сложная и дорогая конструкция. Килограмм сверхпроводящего материала для провода во много раз дороже килограмма меди. Но если сравнить стоимость проводов,

рассчитанных на равную силу тока, то сверхпроводящий провод окажется дешевле медного.

Сверхпроводящие ВТСП-провода

В начале XXI века начинается переход к производству и использованию высокотемпературных сверхпроводящих проводов. Они представляют собой ленты, в отличие от более привычных проводов круглого сечения. ВТСП-провода переходят в сверхпроводящее состояние при температурах выше азотной. Возможность работать при 20–25 К обуславливает гигантский прогресс, поскольку позволяет использовать в прикладных устройствах менее мощные и более дешевые охлаждающие устройства.

Среди ВТСП – проводов выделяют провода двух поколений. Провода 1-го поколения – это провода на основе серебряной матрицы с микроканалами, в которых находится сверхпроводящая керамика, как правило, Bi-Sr-Ca-Cu-O . Их недостатки – наличие больших теплопритоков и механическая хрупкость. Конструкция проводов 2-го поколения решает эту проблему. Они представляют собой многослойную структуру, которая напыляется на ленту из нержавеющей стали. Важную роль играет слой MgO , который напыляется непосредственно на нержавеющую ленту под углом 30–40°. Косое напыление создает на поверхности MgO одинаково направленные борозды. Эти борозды служат для ориентации кристаллов ВТСП-керамики, напыляемых непосредственно на MgO . В качестве ВТСП-керамики используется Y-Ba-Cu-O или близкие к ней по структуре керамики. Слой ВТСП-пленки имеет толщину менее 2 мкм. Структура ВТСП-провода 2-го поколения показана на рис. 7.

В целом эта область исследований крайне перспективна, так как связана с разработкой и применением электродвигателей и генераторов на основе новых сверхпроводящих проводов с использованием безжидкостного охлаждения систем при помощи охладителей, также активно

разрабатываются накопители энергии, токоограничители и другие технические устройства для больших энергетических систем [5].

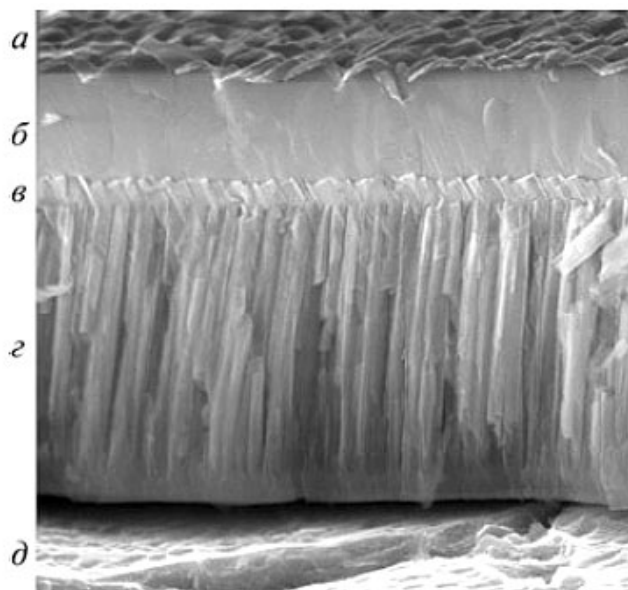


Рисунок 7 - Структура ВТСП-провода 2-го поколения: *a* — защитный слой Cu; *b* — керамика Y–Ba–Cu–O; *c* — ориентированный слой MgO; *c* — неориентированный слой MgO; *d* — лента из нержавеющей стали

Выводы по главе:

- 1) самое перспективное направление использования явления сверхпроводимости – изготовление сверхпроводника, который можно выпускать серийно и который будет удобен в эксплуатации;
- 2) наиболее перспективные сверхпроводящие электромагниты создаются на основе сверхпроводников II рода;
- 3) используемые для изготовления сверхпроводящих проводов материалы хрупки и непластичны, поэтому разрабатываются различные сложные и дорогостоящие технологии, позволяющие уменьшить эти недостатки;
- 4) наиболее широко используемым компонентом при создании сверхпроводящего материала является керамика на основе нескольких элементов, например, Y–Ba–Cu–O, которая в обычных условиях является диэлектриком.

ЭНЕРГЕТИКА

Применение сверхпроводящего оборудования и технологий в электроэнергетике имеет следующие преимущества:

- 1) сокращение потерь электроэнергии примерно в 2 раза;
- 2) снижение массогабаритных показателей оборудования;
- 3) повышение надежности и продление срока эксплуатации электрооборудования за счет снижения старения изоляции;
- 4) повышение надежности и устойчивости работы энергосистем;
- 5) повышение качества электроэнергии, поставляемой потребителям;
- 6) повышение уровня пожарной и экологической безопасности электроэнергетики;
- 7) создание принципиально новых систем энергетики при совмещении с другими инновационными подходами за счет синергетического эффекта.

Особый эффект сверхпроводниковые технологии могут дать при их применении в мегаполисах и крупных городах для организации глубоких вводов мощности и создания токоограничивающих устройств [8].

Кабели

Первые попытки создать сверхпроводниковые кабели были предприняты сразу же после начала промышленного производства низкотемпературных сверхпроводников в середине 1960-х годов. Отсутствие активного сопротивления и крайне высокая плотность тока сверхпроводниковых кабелей были чрезвычайно привлекательны для электроэнергетики. Хотя в СССР и в США к середине 1980-х годов был сделан целый ряд относительно успешных устройств, например, кабель на 3 ГВА, разработанный во ВНИИКП (Всероссийский научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт кабельной промышленности), или кабель Brookhaven National Laboratory (США) на напряжение 138 кВ и мощность 1 ГВА, дальнейшие работы были

свернуты по экономическим соображениям. Криостаты и системы криогенного обеспечения уровня температур в 4,2 К оказались слишком дорогими и сложными в эксплуатации.

Открытие высокотемпературной сверхпроводимости в 1986 г. и появление коммерческих ВТСП проводников к середине 1990-х годов позволили приступить к разработке сверхпроводниковых кабелей на качественно ином уровне. Использование в качестве хладагента жидкого азота при температуре 77 К позволило использовать надежные и экономичные системы криогенного обеспечения. ВТСП кабельные линии электропередачи (ВТСП КЛЭП) обладают рядом преимуществ над традиционными кабельными линиями: большая пропускная способность (даже при снижении класса напряжения), уменьшенные потери, компактность и легкость (при сравнении кабелей на одинаковую мощность), пожаро- и экологическая безопасность.

Специальными расчетами было доказано, что даже при высоких ценах на ВТСП материалы сверхпроводниковые кабели экономически выгодны при уровнях передачи энергии несколько сотен МВА. Следует отметить, что основной экономический эффект от ВТСП кабелей связан с существенным сокращением объема земляных работ, необходимых для прокладки кабеля в черте мегаполиса. Замена существующего кабеля на ВТСП позволяет поднять в несколько раз передаваемую мощность, сведя при этом земляные работы к минимуму. Еще одним преимуществом ВТСП КЛЭП материалов является их токоограничивающее действие. Во время короткого замыкания происходит переход кабеля из сверхпроводящего состояния в нормальное, у него появляется активное сопротивление, за счет которого и ограничивается ток короткого замыкания. После отключения КЗ кабель восстанавливает сверхпроводимость за время меньшее, чем время срабатывания АПВ.

Наиболее очевидные области применения ВТСП:

- 1) глубокие вводы в мегаполисы и крупные энергоемкие комплексы (возможен отказ от высокого напряжения в пользу среднего при увеличении мощности);
- 2) линии электропередачи постоянного тока малой протяженности (например, на сильнонагруженных участках тяговой сети РЖД);
- 3) сильноточные токопроводы на электростанциях.

Существует два вида исполнения сверхпроводящих кабелей: с «теплым» и «холодным диэлектриком». Кабель с «теплым диэлектриком» конструктивно сходен с традиционным кабелем. Охлаждение ВТСП жил производится жидким азотом. Диэлектрик накладывается поверх криостата, что позволяет применять обычные изоляционные материалы. В кабеле с «холодным диэлектриком» ВТСП жила кабеля окружена коаксиальным сверхпроводящим экраном (также навитым из ВТСП лент), служащим для экранирования магнитного поля. Диэлектрик располагается между ВТСП жилой (жилами) и экранирующим слоем. Несомненным плюсом ВТСП кабелей с «холодным диэлектриком» является возможность размещения всех трех фаз в общем криостате (для класса напряжений до 35 кВ). Недостатками ВТСП кабеля с «холодным диэлектриком» является сложная технология изготовления и увеличенный расход сверхпроводящих материалов. Данная конструкция получила большее распространение среди разработчиков.

На сегодняшний день во многих странах мира в опытно-промышленную эксплуатацию запущено несколько коротких ВТСП кабелей. Существуют другие довольно перспективные проекты, реализация которых позволит сделать еще один шаг на пути к массовому применению ВТСП КЛ.

Pirelli Cables (с 2005 года – Prysmian Cables) начала разработки сверхпроводниковых кабелей в середине 1980-х годов и в 1998 году удачно провела испытания прототипа 50-метрового однофазного ВТСП кабеля с «теплым диэлектриком» на напряжение 115 кВ и мощность 400, созданный совместно с правительством США и производителем ВТСП-провода — компанией American Superconductor (AMSC), США.

Одним из лидеров в области ВТСП кабелей можно назвать компанию Southwire, США. В 2000 году она запустила в эксплуатацию трехфазную кабельную перемычку длиной 30 метров на 12,5 кВ и 27 МВА (три однофазных кабеля с «холодным диэлектриком»), включенную в рассечку воздушной ЛЭП, для питания собственного медеплавильного цеха в городе Карроллтон и находившуюся в эксплуатации 6 лет. Кроме того Southwire задействована в программе «Проект Гидра», направленной на разработку и внедрение в сеть центра города Нью-Йорк новой технологии безопасных энергосистем, основанных на ВТСП кабелях (рис. 8) и токоограничителях. Заметных успехов достигли европейские и японские компании.



Рисунок 8 - Первая сверхпроводниковая кабельная линия. Лонг Айленд, США

Россия начала освоение этого сектора на правительственном уровне довольно поздно. В 2007 году ОАО РАО «ЕЭС России» утвердило программу работ по созданию и применению в электроэнергетике технологий и оборудования на основе сверхпроводимости до 2015 года, в которой предусмотрены следующие проекты касаясь ВТСП КЛЭП:

- 1) разработка и создание ВТСП кабеля на напряжение 10 — 20 кВ из ВТСП материалов 1-го поколения;

2) пилотный проект ВТСП кабеля на напряжение 10 — 20 кВ с передаваемой мощностью 100 — 200 МВА длиной более 1 км на ВТСП материалах 1-го поколения;

3) разработка и создание ВТСП кабеля на напряжение от 110 кВ;

4) разработка сверхпроводниковых технологий (в том числе кабелей) для передачи электроэнергии постоянным и переменным током.

ВТСП кабель постоянного тока пока мало рассматривается разработчиками. Существуют несколько лабораторных макетов, самым представительным из которых можно назвать кабель Chubu University, Япония, созданный в 2006 году (рис. 9). Его номинальное напряжение 20 кВ, номинальный ток 2200 А. По оценкам разработчиков Chubu University, применение ВТСП кабелей постоянного тока с номинальным напряжением 20 — 30 кВ несет ощутимые выгоды, так как стоимость преобразовательных агрегатов данного класса напряжения существенно ниже, чем для высоковольтных устройств, а кабель на постоянном токе компактнее. Кроме того, в ВТСП кабелях постоянного тока отсутствуют потери на переменном токе, которые являются одним из основных источников теплопритоков, что снижает габариты криогенной системы. В России работы над ВТСП кабелем постоянного тока ведутся в ГУАП (Санкт Петербург) [9].

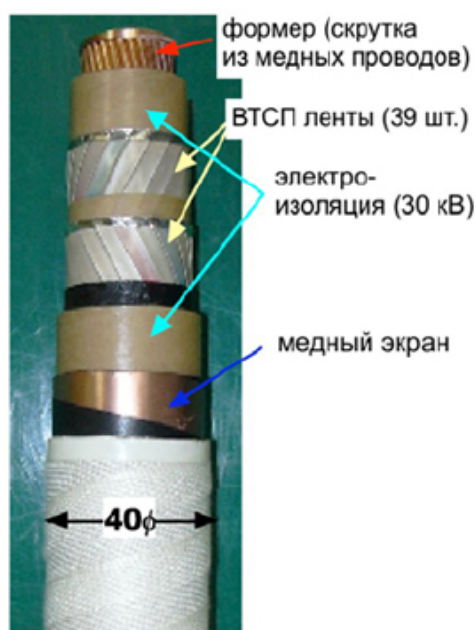


Рисунок 9 - Конструкция ВТСП кабеля Chubu University

Сверхпроводящие машины

Еще одно возможное применение сверхпроводников – мощные генераторы и электродвигатели. Во всех электрических машинах электромеханическое преобразование энергии происходит в результате магнитного взаимодействия двух электромагнитных компонентов, перемещающихся относительно друг друга с некоторой скоростью. Таким образом, удельная мощность машин механически ограничивается относительной скоростью и электрически – напряженностью магнитного поля. В обычных машинах напряженность ограничена насыщением железа, образующего магнитную цепь машины. Обмотки из сверхпроводящих материалов могут создавать огромные магнитные поля в генераторах и электродвигателях, благодаря чему они могут быть значительно более мощными и компактными (рис. 10), чем обычные машины [10].

Уникальный опыт разработки СП генераторов был накоплен в СССР. Исследования в этом направлении начались в 60-х во ВНИИЭлектромаш (Ленинград). Первая электрическая машина со сверхпроводниками была спроектирована в 1963 г. и мощность её составляла всего несколько ватт, а в 1980-1992 гг. первый в мире СП генератор (КТГ-20) мощностью 20 МВт прошел испытания в системе Ленэнерго.

В начале 80-х был создан СП генератор на 20 МВт в США (General Electric). Охлаждаемый гелием сверхпроводящий ротор был разработан фирмой Westinghouse по заказу ВВС США и успешно испытан при вращении со скоростью 12 тыс. оборотов в минуту. Параллельно в США велись работы по созданию СП генераторов со сверхпроводниковым ротором и медным статором, увенчавшиеся созданием машины мощностью 2 МВт. Именно этот дизайн (сверхпроводниковый ротор – резистивный статор) и получил наибольшее распространение в дальнейшем.

Эти достижения открыли путь к созданию машин большего размера, и уже к середине 70-х СП генераторы мощностью порядка 1 ГВт считались принципиально реализуемой задачей [11].

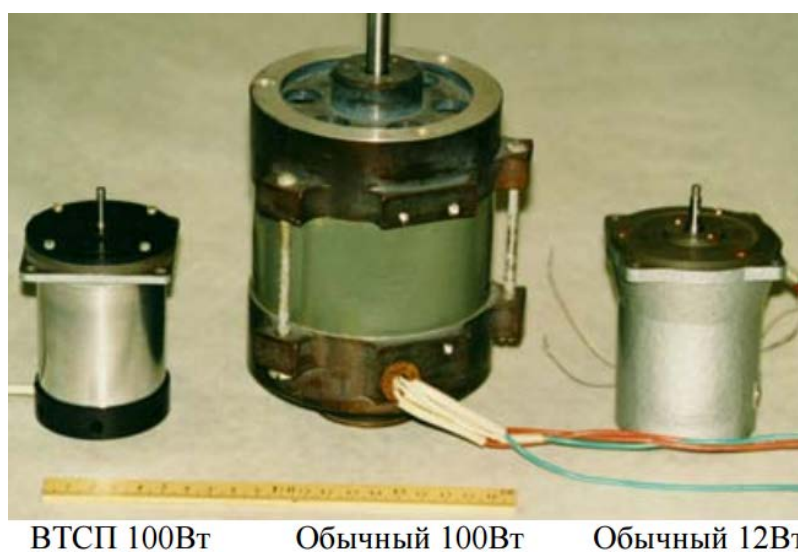


Рисунок 10 – Сравнение традиционных и ВТСП электродвигателей [12]

Сверхпроводящие трансформаторы

Важнейшими элементами энергетических систем и комплексов, связанными с другими элементами не только конструктивно, но и единством протекающих в них процессов, являются силовые трансформаторы, оказывающие существенное влияние на экономию электрической энергии, надежную и экологически чистую транспортировку ее от мест генерации до объектов потребления [13, 4].

Рост мощности силовых трансформаторов энергосистем и комплексов за рубежом и в нашей стране осуществляется за счет увеличения рабочих напряжений обмоток трансформаторов. В нашей стране были достигнуты величины единичной мощности – 1250 МВА и напряжения – 1200 кВ. Дальнейшее повышение мощностей силовых трансформаторов за счет увеличения напряжений создает все более трудные проблемы, связанные с их применением в энергетических системах и комплексах. Так, практически достигнуты напряжения, предельно возможные по электрической прочности воздуха; габариты и масса наиболее мощных генераторных трансформаторов

во много раз превышают допустимые значения по грузоподъемности и площади железнодорожных платформ. Вопросы экономии электроэнергии, связанные с уменьшением потерь в силовых трансформаторах, стимулируют развитие энергосберегающих технологий на современном этапе развития трансформаторостроения. Использование сверхпроводящих обмоток в силовых трансформаторах позволит уменьшить массогабаритные показатели трансформаторов, снизит потери в обмотках, увеличит токонесущую способность обмоток, КПД и коэффициент мощности.

Применение жидкого азота в качестве хладагента сверхпроводящих трансформаторов (СПТ) позволит, помимо основной функции, использовать его для высокоэффективной изоляции, обладающей отличными диэлектрическими свойствами, отличающимися от традиционной изоляции такими параметрами как нестарение, экологическая чистота, противопожарная безопасность. Использование жидкого азота в качестве изоляционного материала в СП трансформаторах ведет к увеличению ресурсосбережения и надежности. Сочетание сверхпроводящих трансформаторов с устройствами силовой электроники позволит использовать такие трансформаторы в качестве электромагнитных устройств ввода энергии переменного тока в сверхпроводящие энергетические системы постоянного тока, а также для соединения энергетических систем и сетей, ЛЭП и кабелей постоянного тока с разным уровнем напряжения [14, 277].

На сегодняшний день в мире существует три основные разработки по созданию ВТСП-трансформатора: в США, Европе и в Японии. Работа над ними началась примерно в одно и то же время, и в 1997 году все три были реализованы в опытных образцах.

Первым стал трансформатор на напряжение 18,7/0,4 кВ мощностью 630 кВА производства АВВ при участии американской компании ASC и французской электроэнергетической системы Electricite de France (EDF).

На его примере рассмотрим принцип устройства ВТСП-трансформатора (рис. 11). Обмотки погружены в жидкий азот, служащий

одновременно и изоляцией, и охлаждающей средой. Сердечник трансформатора работает при температуре окружающей среды, так как его охлаждение приведет только к лишним нагрузкам криогенной системы, а не к улучшенным характеристикам. Обмотки термически изолированы от сердечника и окружающей среды с помощью двустенных контейнеров (криостатов), выполненных из эпоксиды, между стенками которых поддерживается вакуум, обеспечиваемый непрерывной работой насоса.

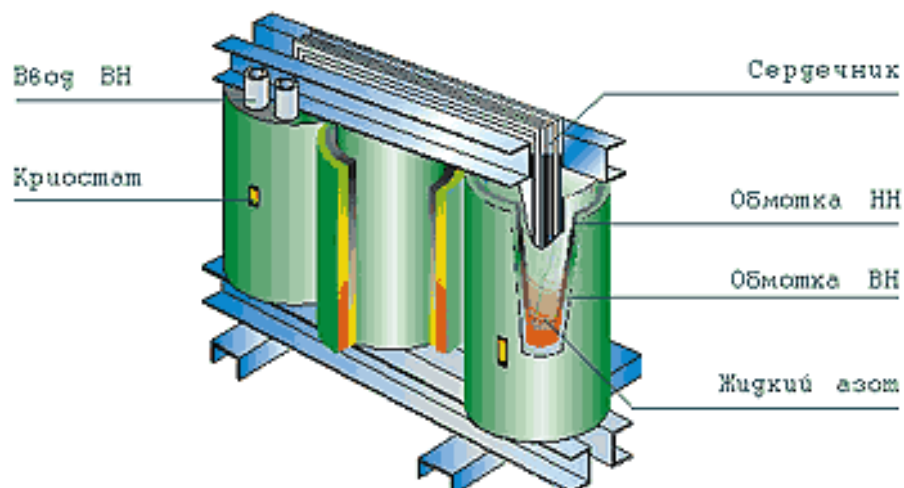


Рисунок 11 - Устройство ВТСП-трансформатора

При проведении испытаний потери при номинальном токе составили 337 Вт, а потери холостого хода в сердечнике – 2,1 кВт. Общие тепловые потери равны примерно половине потерь в проводе. Далее АВВ делает трансформатор 10 МВА, а EDF устанавливает его в своей сети для проведения полноценных испытаний. Дальнейшей целью ставится достижение мощности ВТСП-трансформатора 100 МВА.

Вторым был испытан трансформатор 500 кВА 6,6/3,3 кВ производства Fuji Electric (Япония) с применением ВТСП-лент другой японской компании Sumitomo Electric Corporation. В разработке участвовали специалисты университета Kyushu. Потери в сердечнике составили 2,4 кВт, потери при номинальном токе – 115 Вт. Японские разработчики решили пока не создавать ВТСП-трансформатор на большие мощности, а улучшить характеристики уже сделанного, а именно усовершенствовать систему охлаждения и ВТСП-провод для обмотки.

Третьим, но самым большим по мощности, стал трансформатор 1000 кВА американского производства: Waukesha Electric (производитель трансформаторов), IGC Super Power (изготовитель ВТСП-провода) и Energy East (электроэнергетическая компания, конечный потребитель).

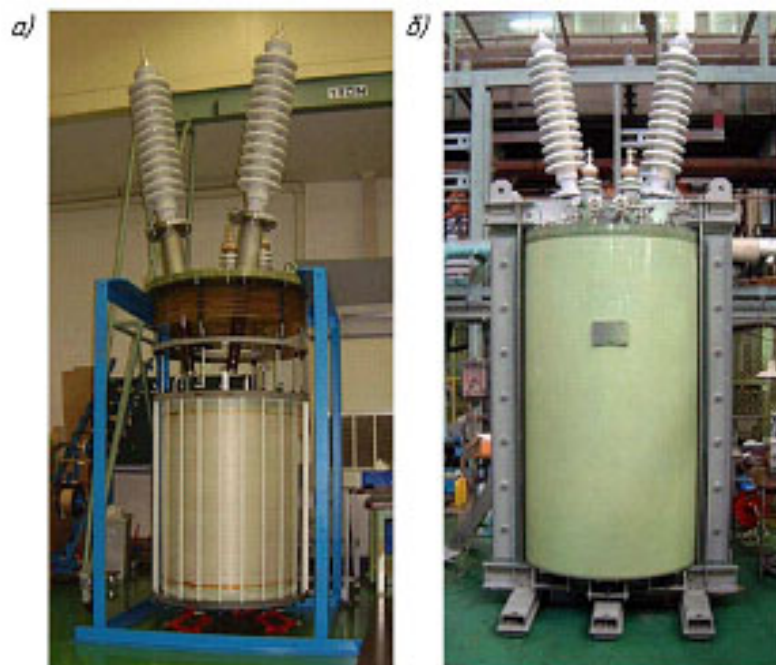


Рисунок 12 - Однофазный ВТСП трансформатор: а) в разобранном состоянии; б) в собранном состоянии

По данным Министерства энергетики США, сделавшего в 1993 году подробный анализ возможного применения ВТСП-трансформаторов мощностью до 30 МВА, затраты (при средней оценке) на весь срок службы при эксплуатации ВТСП-трансформаторов будут наполовину меньше по сравнению с затратами на обслуживание традиционно применяемых трансформаторов. А в результате анализа перспектив применения ВТСП-трансформаторов 30–1500 МВА, представленного на конференции во Франции в 1994 году, было выявлено, что затраты будут на 70% меньше. Многие разработчики ВТСП-проводов и трансформаторов полагали, что к началу – середине 10-х годов, когда во многих странах мира начнет производиться активная замена электрооборудования, отработавшего свой срок службы, резко возрастет спрос именно на ВТСП-трансформаторы [15].

Однако, несмотря на неоспоримые преимущества, сверхпроводящие трансформаторы имеют и существенные недостатки. Главным образом они связаны с защитой трансформатора от потери его сверхпроводящих свойств при возможных перегрузках, перегревах, коротких замыканиях, в случае если ток, магнитное поле или температура достигнут максимальных значений. Подобные непредвиденные обстоятельства могут привести к разрушению трансформатора. Впрочем, даже если разрушения и не произойдет, трансформатору понадобится несколько часов на охлаждение и восстановление сверхпроводящих способностей. Такие перерывы в электроснабжении неприемлемы. Поэтому прежде, чем вводить сверхпроводящие трансформаторы в серийное производство, необходимо разработать систему защиты оборудования от аварийных режимов и детально проработать возможность альтернативного обеспечения системы электроэнергией на время простоя сверхпроводящего трансформатора [16].

Успехи, достигнутые в этой области, позволяют надеяться, что в недалеком будущем проблема защиты трансформаторов нового поколения будет успешно решена и оборудование займет свое место на электроподстанциях.

Ограничители токов короткого замыкания

Рост уровней токов короткого замыкания предъявляет повышенные требования к обеспечению электродинамической и термической стойкости электротехнического оборудования и надежности его работы в режимах КЗ. Особенно актуальной эта проблема становится для сверхпроводящего (СП) электрооборудования: СП трансформаторов, СП генераторов и т. д. Внутренние сопротивления СП электрооборудования по сравнению с их значениями у традиционного оборудования гораздо ниже, вследствие чего токи КЗ могут принимать недопустимо высокие значения. Эффективным способом ограничения токов КЗ является использование быстродействующих СП токоограничивающих устройств, работающих на

основе нелинейности вольт-амперной характеристики, когда сопротивление сверхпроводника меняется в зависимости от величины тока, что позволяет ограничить как ударные, так и установившиеся токи КЗ. Быстродействие СП токоограничителя (СПТО) достигается благодаря тому, что меняется фазовое состояние сверхпроводника под действием возросшего магнитного поля, создаваемого непосредственно самим током. Быстродействующие СПТО могут применяться в цепях как переменного, так и постоянного тока. В зависимости от вида нелинейных элементов СПТО может представлять собой один из следующих типов.

Дроссельный ДПТО. Нелинейный элемент в дроссельном СПТО выполнен в виде СП дросселя с малой индуктивностью. В режиме КЗ дроссель теряет сверхпроводимость и переходит в нормальное состояние, ограничивая ток КЗ. Параллельно с нелинейным элементом соединен СП дроссель с линейной характеристикой, назначением которой является токовая разгрузка и уменьшение потерь в нелинейном элементе.

СПТО с электромагнитным экраном. Нелинейный элемент выполнен в виде электромагнитного экрана, защищающего определенный объем от проникновения магнитного поля. Экран находится в электромагнитном поле, создаваемом намагничивающей обмоткой с током нагрузки защищаемого объекта, и переходит в нормальное состояние при увеличении тока в режиме КЗ. При этом исходный объем, экранируемый в нормальном режиме, перестает экранироваться, магнитное поле в нем увеличивается, что вызывает, соответственно, увеличение индуктивности, индуктивного сопротивления, и, как следствие этого, ограничение тока КЗ.

Трансформаторный СПТО. Нелинейным элементом СПТО трансформаторного типа является СП первичная или вторичная обмотка. В режиме КЗ обмотка трансформатора переходит из сверхпроводящего в нормальное состояние, что вызывает переход трансформатора из режима короткого замыкания в режим холостого хода с увеличением индуктивного

сопротивления трансформатора от сопротивления КЗ до холостого хода, что, в свою очередь, приводит к ограничению тока КЗ [17, 39].

Накопители энергии

Все больший интерес у энергетиков вызывают возможности накопителей энергии. Тенденция нынешнего времени – преобразование рынка электроэнергии в конкурентный. В США, например, бурное развитие коммерческих и «независимых» компаний привело к тому, что более 30% генерирующих мощностей попали в категорию «non-utility» (некоммунальные). Растет интерес к производству и распределению электроэнергии на месте потребления, чтобы обойтись без услуг сетевых компаний. Осваиваются децентрализованные источники возобновляемой энергии, в связи с чем возникают затруднения в подключении их к общей сети. В период раздробления инфраструктуры накопители энергии становятся важным средством оптимизации режимов энергосистемы, поддержки распределенной энергетики. Коммерческая основа накопителя — сохранение продукции, полученной по низшей цене, и реализация ее по более высокой при необходимости. Совет по накопителям энергии, созданный в США, называет их «шестым измерением» производства и распределения электроэнергии (остальные пять — топливоснабжение, генерирование, передача, распределение электроэнергии и обслуживание потребителей). Накопители энергии оптимальным образом соединяют между собой эти пять основ энергетики.

Потенциальные возможности применения накопителей электроэнергии:

- 1) Управление режимами нагрузки — разряд накопителя во время пика нагрузки и зарядка в ночное время (выравнивание дневного и ночного графиков нагрузки).
- 2) Управление потоками мощности — питание местных нагрузок, когда с этим не справляется общая сеть.

3) Вращающийся резерв — возможность быстрого замещения вышедшего из работы крупнейшего генератора в энергосистеме.

4) Помощь установкам, использующим возобновляемые источники энергии — выравнивание графика подачи мощности.

5) Повышение возможности передачи энергии — участие в управлении устойчивостью, регулировании напряжения, частоты и реактивной мощности, повышающие стабильность работы сетей.

6) Выравнивание графика нагрузки в сетях со значительной долей распределенных источников энергоснабжения.

7) Повышение качества электроэнергии — поддержание стабильности напряжения установкой накопителей как на питающих фидерах, так и непосредственно у потребителей, особенно при резкопеременном характере нагрузки. Источник мощности для непрерывного электроснабжения.

Накопители энергии позволяют снизить требования к диапазону регулирования электростанций, работающих в базисном режиме, повысить эффективность работы ЛЭП, загрузка которых составляет в среднем 50-65 % от их пропускной способности.

Накопители как резерв мощности помогут при системных авариях: ВАЭС Norton в Огайо мощностью 2700 МВт, создаваемая несколько лет, предназначена для подключения к сети First Energy Corp., в которой отказ ВЛ привел к крупнейшей системной аварии в США и Канаде в августе 2003 г.. По мнению специалистов, ВАЭС Norton могла бы остановить развитие системной аварии.

Сверхпроводниковые накопители (СПИН'ы) запасают энергию в магнитном поле индуктивной катушки из сверхпроводника, образуемом протеканием постоянного тока. Их главное преимущество — высокий КПД преобразования (больше 95%) и возможность выдавать мощность практически мгновенно. Они выдерживают тысячи циклов «заряд-разряд» без каких-либо последствий для них [18, 42-43].

К настоящему времени сформировалось достаточно общее представление о разделении функций технически реализуемых накопителей в зависимости от их энергоемкости:

– накопители энергоемкостью $(1-10) \cdot 10^8$ Дж для повышения статической и динамической устойчивости энергосистем;

– накопители энергоемкостью $(3-10) \cdot 10^6$ Дж (микроСПИН) для поддержания локального напряжения на подстанциях при изменениях нагрузки, а также при кратковременных аварийных перерывах электроснабжения потребителей из-за внезапных отключений воздушных линий и кратковременного снижения напряжения на 30-90%.

Выводы по главе:

1) явление сверхпроводимости получило широкое применение в электроэнергетике, поскольку во всех устройствах есть токоведущие части, обладающие сопротивлениями, из-за которых происходят потери электроэнергии;

2) каждое устройство, участвующее в генерировании, преобразовании и передаче электроэнергии можно заменить аналогичным сверхпроводящим, что и происходит, но пока только в ограниченном объеме;

3) в СПТО всех типов происходят сходные электромагнитные процессы, вызванные увеличением сопротивления при фазовых переходах СП нелинейного элемента при шунтировании его индуктивным сопротивлением;

4) мощнейшие сверхпроводящие электромагниты способны накапливать электроэнергию очень больших значений, что дало возможность развития распределенной генерации и повышения надежности энергетических систем;

5) сверхпроводниковые накопители электроэнергии позволяют оптимальным образом соединить между собой пять основных процессов энергетики: топливоснабжение, генерирование, передача, распределение и потребление электроэнергии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Еще на заре открытия сверхпроводимости было очевидно, что данное явление станет одним из главных направлений развития науки, поскольку дает человечеству много возможностей для развития других аспектов жизни.

Конечно, не все так просто: для достижения сверхпроводящего состояния необходима низкая температура, а для поддержания низкой температуры нужна сложная, дорогая и энергоемкая аппаратура. Поэтому возникает вопрос: так ли выгодно использовать сверхпроводимость, чтобы сэкономить некоторое количество энергии, если на ее создание нужно потратить столько же?

Открытие высокотемпературных сверхпроводников дало возможность использовать дешевый, по сравнению с гелием, охладитель – жидкий азот. Теперь нужны меньшие затраты на охлаждение и было доказано, что уже при передаче нескольких МВА сверхпроводимость может быть весьма выгодной.

В понимании явления сверхпроводимости по-прежнему много остается неясного. Ведутся исследования как по объяснению процессов, происходящих в веществе при переходе в сверхпроводящее состояние, так и по поискам и созданию новых материалов, которые дадут возможность еще сильнее повысить критическую температуру. Следует отметить, что в данной области исследования есть цель – достижение комнатно-температурной сверхпроводимости. Да, никто не знает, как это сделать, но в то же время не доказано, что это невозможно. До сих пор физики искали сверхпроводники среди природных соединений. По-видимому, в перспективе они перейдут к созданию искусственных веществ – носителей нужных свойств и качеств. Уже сейчас появляются возможности «поатомной» сборки искусственных неоднородных структур, которая широко используется в полупроводниковых технологиях. Возможно, именно там и лежит секрет КТСП.

Нельзя не оценить возможности, которые дает сверхпроводимость: от фиксации невероятно маленьких по величине электромагнитных импульсов

человеческого мозга до создания сверхмощных магнитов, которые при прежнем уровне развития техники были немыслимы.

Что касается непосредственно электроэнергетики, то в этой сфере сверхпроводимость позволяет увеличить плотность тока в проводниках, снизить потери электроэнергии до минимальных значений, тем самым существенно повысить эффективность всей энергосистемы.

На основе сверхпроводников создают мощные электродвигатели и генераторы с высоким КПД, малыми габаритами и улучшенными рабочими характеристиками, трансформаторы, в которых охладитель используется не только для поддержания необходимой для сверхпроводимости низкой температуры, но и в качестве изоляции.

Крайне сложно создать такое протяженное и равномерно охлаждаемое устройство как воздушная ЛЭП. Однако короткие (относительно ВЛЭП) кабельные линии из сверхпроводящего материала в данный момент вполне реальны. Накопители энергии становятся важным средством оптимизации режимов энергосистемы, поддержки распределенной энергетики, так как с их помощью появилась возможность запасать произведенную электроэнергию в больших объемах.

Рост уровней токов КЗ предъявляет повышенные требования к обеспечению электродинамической и термической стойкости СП электротехнического оборудования и надежности его работы в режимах КЗ. Для удовлетворения этих требований необходимо использовать быстродействующие СП токоограничивающие устройства, позволяющие ограничить ударные и установившиеся токи КЗ. Таким образом, каждое устройство, участвующее в генерировании, преобразовании и передаче электроэнергии можно заменить аналогичным сверхпроводящим, что и происходит, но пока только в ограниченном объеме. Прогресс сверхпроводящей технологии и ее «продвижение» на мировой электроэнергетический рынок сильно зависят от результатов демонстрации и успешной работы прототипов всех видов продукции [19, 35].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ципенюк, Ю. М. Физические основы сверхпроводимости: Учеб. пособие: Для вузов / Ю. М. Ципенюк – М.: изд-во МФТИ, 2002. – 160 с.
2. Гинзбург, В. Л. О сверхпроводимости и о сверхтекучести. Автобиография: Сборник статей и выступлений. / В. Л. Гинзбург – М.: Издательство физико-математической литературы, 2006. – 228 с.
3. http://viktor19451.narod.ru/Rezume_proekta.pdf
4. <http://www.energyland.info/analitic-show-9615>
5. Гинзбург, В. Л. Сверхпроводимость / В.Л. Гинзбург, Е.А. Андрюшин – М.: Альфа-М, 2006. – 112 с.
6. <http://www.energyland.info/analitic-show-9615>
7. <http://home.cern/about/experiments/atlas>
8. Дорофеев, В. В. Проблемы создания и применения в электрических сетях устройств, использующих явления сверхпроводимости / В. В. Дорофеев, Н. А. Черноплеков, В. Е. Кейлин и др. // Электричество. – 2005. – №7 – с. 22-30.
9. Елагин, П. В. Сверхпроводниковые кабели: от лабораторных макетов к полупромышленным образцам / П. В. Елагин // Кабель – news. – 2009. – №12-1 – с. 70-80.
10. Сверхпроводящие машины и устройства / под ред. С. Фонера, Б. Шварц; пер с англ. под ред. Е. Ю. Клименко – М.: изд-во Мир, 1977. – 765 с.
11. Шевцов, А. В. Использование явления сверхпроводимости в электротехнике / А.В.Шевцов, А.Ф. Зибольд // Межвузовская студенческая конференция "Физика и научно-технический прогресс" (ФиНаТ-2006) - <http://masters.donntu.org/2009/eltf/shevtsov/library/Source1.htm>.
12. Ковалев, Л.К. Новые типы сверхпроводниковых электрических машин / Л. К. Ковалев, К. В. Илюшкин, К. Л. Ковалев и др. // Сверхпроводимость: исследования и разработки, 2002, №11 – с. 301-302.

13. Джафаров, Э. А. Энергосберегающие трансформаторы энергетических систем на основе сверхпроводниковых технологий и силовой электроники.: дисс... канд. тех. наук / Э. А. Джафаров. – М., 2004. – 234 с.

14. Лутидзе, Ш. И. Сверхпроводящие трансформаторы энергетического назначения // Ш. И. Лутидзе, Э. А. Джафаров. – М.: Научтехлитиздат, 2002. – с. 277-278.

15. Елагин, П. В. Высокотемпературные сверхпроводниковые трансформаторы. Новое поколение подстанционного оборудования / П. В. Елагин // Новости электроники. – 2005. - №1. – <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/31/04.php>

16. <http://silovoytransformator.ru/stati/umnye-transformatory-tehnologii-buduschego.htm>

17. Блинков, Е. Л. Сверхпроводящие токоограничители / Е. Л. Блинков, Ш. И. Лутидзе, Э. А. Джафаров. // Электро. – 2003. - №6. – с. 39-41.

18. Алексеев, Б. А. Применение накопителей энергии в электроэнергетике / Б.А. Алексеев // Электро. – 2005. – №1 – с. 42-46.

19. Покровский, Д. В. Некоторые аспекты применения высокотемпературных сверхпроводников в энергетике / Д. В. Покровский // Электро. – 2004. – №4. – с. 34-39.