

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЕРХПРОВОДНИКОВ В ЭЛЕКТРОМАШИНОСТРОЕНИИ, КАК ФАКТОР ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

В статье проведена оценка современного уровня практического использования высокотемпературных сверхпроводников для электроэнергетического оборудования, установлены области наиболее перспективного применения сверхпроводников в электротехнических устройствах, в частности, в турбогенераторах.

**Введение.** Очевидно необходимый перевод электротехнического оборудования на сверхпроводниковые (СП) материалы с целью снижения потерь в электрооборудовании (ЭО) сдерживается их высокой стоимостью, дорогой, сложной технологией изготовления и необходимостью охлаждения до сверхнизких температур, [1]. С открытием высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП-сти), после достаточно длинного периода снижения интереса к практическому использованию СП-ков в технике, активизировались исследования их применению. Наиболее перспективно и экономически целесообразно применение ВТСП-ков, на наш взгляд, в электроэнергетике, где снижение потерь и повышение КПД даже на (0,5 – 1,5)% дает значительный экономический эффект, в целом эквивалентный постройке новых блоков ТЭС.

Появление ВТСП-ов, т.е. соединений, способных переходить в СП-щее состояние при температурах выше температуры кипения азота ( $T_{critN} = 77,2$  К), в конце 80-х годов 20-го века привело к активизации работ по теоретическим и, самое главное, практическим исследованиям в области применения СП-ков в электротехнических изделиях.

**Теоретический анализ.** Современное состояние энергетики, необходимость внедрения энергосберегающих технологий, продление срока эксплуатации действующего оборудования за счет его модернизации, проведения реконструкции с внедрением новых технологий, поиск недобавляющих тепло источников и т.д. требует интенсификации научных исследований по поиску новых источников и способов получения электроэнергии.

Практическое использование СП-ков в электроэнергетике, в турбогенераторах (ТГ) и других элементах энергогенерирующих систем, стало перспективным и практически обоснованным после открытия ВТСП. В начале 1987 г. появились сообщения о разработке керамического материала со структурой  $YBa_2Cu_3O_7$ , в котором СП состояние наступает ( $T_{crit}$ ) при 93 К в поле с  $B_{crit}=5,7$  Тл. Такие материалы имеют

структуру типа перовскита (минерал  $CaTiO_3$ ). В системах  $Y-Ba-Cu-O$  в настоящее время достигнута плотность тока до  $10^4$  А/см<sup>2</sup>, т.е. не меньше, чем в металлических СП-никах. Наиболее перспективны для промышленного использования висмутовые системы  $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_x$ , температура перехода которых в резистивное состояние достигает 115 К. Появляются отдельные публикации о получении ВТСП с  $T_{crit}=250$  К.

Первая официальная теория СП-мости, разработанная в 1957 г., получила название «теория БКШ» по первым буквам фамилий ее авторов (Бардина – Купера - Шриффера). Теория объясняла причины возникновения СП-мости, и впервые привела к установлению связи между критической температурой  $T_{crit}$  и параметрами образца. Эта теория основывается на том, что электроны в СП-ке объединяются в пары, взаимодействуя через кристаллическую решетку. Они тесно связаны между собой, поэтому эта пара очень устойчива. Мощные связи позволяют электронам двигаться без всякого сопротивления сквозь решетку кристалла, помогая друг другу. Как известно, одноименные заряды отталкиваются. Но если они находятся в какой-либо среде, то она оказывает влияние на взаимодействие зарядов и даже может изменять его знак. По закону Кулона сила взаимодействия обратно пропорциональна диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ . Поэтому, если среда такова, что  $\epsilon$  отрицательна, то одноименные заряды будут притягиваться. В СП-ках роль такой среды играет кристаллическая решетка. Когда первый электрон пролетает мимо положительно заряженных ионов, он вызывает деформацию решетки. Электрон притягивает к себе окружающие положительные ионы, поляризуя кристаллическую решетку, т.е. формирует скопление положительного заряда вблизи поляризующего электрона. Второй электрон притягивается к области с избытком положительных ионов, т.е. к первому электрону, который как бы окутывается облаком положительного заряда. Т.о., по теории БКШ, электрон может возбудить колебания кристаллической решетки, которая, в свою очередь, воздействует на этот и на любой другой электрон. Такое взаимодействие приводит к согласованному движению пары электронов, т.е., вопреки кулоновскому отталкиванию, электроны могут оказаться связанными друг с другом, образуя пары.

В 1972 г. авторы теории БКШ получили Нобелевскую премию. Но эта теория фактически остановила работы по практическому использованию СП-ков. Для объяснения механизма существования ВТСП необходимо было искать другой механизм, отличный от БКШ, и один из возможных подходов описан американским физиком Литтлом. Он предположил, что в органических веществах особого строения

возможна СП-мость даже при комнатных температурах. Основная идея заключается в получении своеобразной полимерной нитки с регулярно расположенными электронными фрагментами. Корреляция электронов, движущихся вдоль цепочки, осуществляется за счет поляризации этих фрагментов, а не кристаллической решетки. Поскольку масса электрона на несколько порядков меньше массы любого иона, поляризация электронных фрагментов может быть более сильной, а критическая температура более высокой, чем при фононовом механизме теории БКШ. Одновременно, в 1950 г., Гинзбург и Ландау предложили феноменологическую теорию СП-сти, позволившую рассчитать ряд свойств СП-ков и описать их поведение во внешнем поле. Эта теория не отвергала теорию куперовских пар (БКШ), но снимала верхнюю границу их существования ( $T_{\text{crit}}=30$  К). В основе теоретической модели ВТСП-сти Гинзбурга-Ландау лежит экситонный механизм взаимодействия электронов, согласно которой в электронной системе существуют особые волны – экситоны. Подобно фононам, они являются квазичастицами, перемещающимися по кристаллу, и не связаны с переносом электрического заряда и массы. Модельный образец такого СП-ника представляет собой металлическую пленку в слоях диэлектрика или полупроводника. Электроны проводимости, движущиеся в металле, отталкивают электроны диэлектрика, то есть окружают себя облаком избыточного положительного заряда, который и приводит к образованию электронной пары. Такой механизм корреляции электронов предсказывает возможность существования весьма высоких значений критической температуры ( $T_{\text{crit}}=200$  К). Открытие ВТСП-ков опять активизировало интерес, и, соответственно, объем материальных вложений в развитие технологий изготовления промышленно применяемых СП-ников.

Хотя низкотемпературные СП-ки (НТСП) сразу не нашли широкого применения в энергетике, они все-таки заняли несколько производственных «ниш», и ежегодная потребность в СП-щем ЭО оценивается в 300 млн. долл., [2,3]. Ежегодно в мире производится более тысячи тонн этого вещества, [3].

Переход от НТСП-ков к ВТСП-м делает возможным повысить рабочие температуры СП-ков вплоть до азотных ( $T_{\text{crit}} \geq 77$  К), заменить жидкий гелий на жидкий азот, что упрощает системы криостатирования и сокращает эксплуатационные расходы. Есть два главных направления в применении СП-сти: в магнитных системах и в электрических машинах (прежде всего, в ТГ). Широкое применение СП-сти в ЭО при генерации, транспортировке и потреблении электроэнергии, позволит увеличить эффективность использования электроэнер-

гии на 5-7 %, а, следовательно, на эту же величину сократить потребление первичных органических энергоносителей.

Следует ожидать, что наиболее ощутимый эффект принесет комплексное использование СП-го оборудования, например, электростанция или распределительная подстанция полностью состоящая из СП-го оборудования. Это может значительно улучшать ситуацию в энергосистемах и сетях, увеличить их устойчивость, надежность и пропускную способность. Чрезвычайно широкий спектр применения ВТСП- материалов обусловлен отсутствием потерь на постоянном токе и небольшими потерями на переменном, экранированием магнитных и электромагнитных полей, возможностью передачи сигналов с минимальными искажениями, выполнением аналоговых и цифровых функций при 1000-кратном уменьшении мощности рассеяния и 10-20-кратном повышении быстродействия в сравнении с современными полупроводниковыми приборами. Но наибольший интерес для снижения потерь в энергосистемах имеет использование достижений СП-сти для электромашиностроения, как наиболее энергоемкой, распространенной отрасли, имеющей огромное число установленных единиц оборудования, в которых выделяются значительные потери. Наиболее целесообразное применение СП-ков именно в больших машинах, потому что в меру увеличения размеров машины вклад в ее стоимость системы криогенного обеспечения уменьшается.

В настоящее время сложность технологий изготовления ВТСП-ков определяет их высокую стоимость. Однако за последние несколько лет цены на СП-ки упали в 7-8 раз, и эксперты прогнозируют их дальнейшее снижение, [1,2]. По оценкам Всемирного банка, уже через 10 лет рынок СП-го ЭО будет составлять 70 млрд.дол., а через двадцать лет превысит 240 млрд. дол., [2,3]. Применение СП-ков в электрических машинах (ЭМ) затруднено в основном потерями на переменном токе. В частности, значительные потери в СП-ках на переменном токе промышленной частоты ограничивают область их применения обмотками, которые имеют практически постоянное потокосцепление, т.е. обмотками возбуждения. В машинах любого класса можно увеличить мощность, повысив ток или напряженность магнитного поля, создаваемого обмотками. Однако, есть зависимость предельно допустимого магнитного поля якоря от поля индуктора. Якорь также может быть как неподвижным, так и вращающимся. Обмотка якоря должна быть сконструирована таким образом, чтобы максимально использовалось сильное поле, создаваемое СП-ми обмотки возбуждения. Ферромагнитный материал (если он вообще присутствует в конструкции машины) служит только внешним магнитным экраном. В ТГ слишком силь-

ное магнитное поле реакции якоря приводит к настолько высокой реактивности машины, что она выходит из синхронизма во время переходных процессов.

К настоящему времени известны данные успешных испытаний образцов ЭО в СП-м исполнении, в первую очередь, на базе ВТСП - технологий: ЭМ мощностью в несколько МВА, трансформаторы - до 1,5 МВА, участки кабельных линий электропередачи, рассчитанные на мощность до 440 МВА и т.д. В СП-щем проводе допустимая плотность тока в  $10 \div 50$  раз превышает плотность тока в резистивном ЭО. Магнитные поля в ЭМ можно будет довести до значений порядка 10 Тл, по сравнению с 0,8...1 Тл в обычных машинах. Если учесть, что размеры электротехнических устройств обратно пропорциональны произведению допустимой плотности тока на величину индукции магнитного поля, то очевидно, что применение СП-ов уменьшит размеры и массу ЭО во много раз, [4, 5].

**Вывод.** Применение СП-ков в электромашиностроении позволяет уменьшить массу и габаритные размеры ЭО, увеличить предельную мощность и КПД турбогенераторов, получить электродвигатели с минимальным моментом инерции, с малым временем реверса, со специальными характеристиками. Совершенствование генераторов и двигателей – основных элементов любой энергосистемы, – важный шаг в совершенствовании энергосистемы в целом.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шевченко В.В., Шевченко С.Е., Шуджан Р.Я. Предложения по использованию сверхпроводников в электротехнических устройствах. //Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2007. – № 1(13). – С. 96-101.
2. Шевченко В.В., Гавриш А.Ю. Современное состояние и перспективы применения сверхпроводников в электроэнергетике. //Системи обробки інформації. Збірник наукових праць. Вип. 5(45). – Харьков, 2005. – С. 194–204.
3. Черноплеков Н.А., Чубраева Л.И. Сверхпроводниковые обмоточные материалы для современной электроэнергетики. //Проблемы создания и эксплуатации новых типов электроэнергетического оборудования. Вип.5. ОЭЭП РАН. – СПб., 2003.