

УДК 537.312.62:621.313.322

В.В. Шевченко, С.В. Пидкивка, С.Е. Шевченко

Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ РАБОТЫ МАТЕРИАЛОВ ПРИ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ И ВЫБОР МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ

В статье проведена оценка современного состояния развития высокотемпературных сверхпроводников, определены особенности поведения материалов при глубоком охлаждении, установлены области наиболее перспективного применения сверхпроводников в электротехнических устройствах, в частности, в турбогенераторах и в других элементах электрооборудования.

Ключевые слова: сверхпроводимость, технология, криогенная техника, электроэнергетика, турбогенератор.

Введение

Постановка проблемы. Полный перевод электротехнического оборудования на сверхпроводниковые материалы сдерживается их высокой стоимостью, дорогой, сложной технологией и необходимостью охлаждения до сверхнизких температур, [1 – 3]. С открытием высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП-сти) снова, после достаточно длинного периода снижения интереса к практическому применению сверхпроводников в технике, активизировались исследования по оценке возможных областей их использования. Наиболее перспективно и экономически целесообразно применение ВТСП-ков, на наш взгляд, в силовой электроэнергетике, где снижение потерь и повышение КПД даже на (0,5 – 1,5)% дает значительный экономический эффект. Но для практического применения ВТСП-ков в электрооборудовании необходимо знать поведение материалов при глубоком охлаждении. Появление ВТСП-ов, т.е. соединений, способных переходить в СП-щее состояние при температурах выше температуры кипения азота ($T_K = 77,2$ К), в конце 80-х годов двадцатого века привело к активизации работ по теоретическим и, самое главное, по практическим исследованиям в области применения СП-ков в электротехнических изделиях. Развитие физики низких температур продолжается.

Анализ последних исследований и публикаций. В литературных источниках приведены данные по объяснению явления СП-сти, по развитию теории и направлениям практического использования СП-ков в различных областях техники. Большое внимание уделяется вопросам технологии изготовления ВТСП-в [1 – 3], а также особенностям работы конструкционных, изоляционных и проводниковых материалов при глубоком охлаждении.

Цель статьи. Оценить современное состояние развития ВТСП-в, особенности поведения материалов при глубоком охлаждении, области наиболее

перспективного применения СП-ков в электротехнических устройствах, в частности, в турбогенераторах (ТГ) и в других элементах электрооборудования (ЭО).

Изложение основного материала

Современное состояние энергетики требует интенсификации научных исследований по поиску новых источников и способов получения электроэнергии:

- продление срока эксплуатации действующего оборудования за счет его модернизации, проведение реконструкции с внедрением новых технологий;

- повышение эффективности энергоустановок классических ТЭС, АЭС и ГЭС;

- внедрение нового ЭО с высокими энергетическими характеристиками: КПД, $\cos\phi$, линейными нагрузками, индукцией, плотностью тока и т.д.

Но наиболее перспективен поиск новых технологий в получении электроэнергии. На наш взгляд, особое внимание следует уделять исследованиям криогенного и СП-щего ЭО. В настоящее время использование СП-ков в промышленности, на транспорте и в энергетике, требует немедленного исследования и внедрения, т.к. созданы ВТСП-ки с температурой выше 77,3 К, т.е. выше температуры кипения азота.

В 1950 г. Гинзбург и Ландау предложили феноменологическую теорию СП-сти, позволившую рассчитать ряд свойств СП-ников и описать их поведение во внешнем поле. Первая официальная теория СП-мости, разработанная в 1957 г., получила название «теория БКШ» по первым буквам фамилий ее авторов, в 1972 г. они получили Нобелевскую премию. Теория объясняла причины возникновения СП-мости, и впервые привела к установлению связи между критической температурой T_K и параметрами образца. Эта теория основывается на том, что электроны в СП-ке объединяются в пары, взаимодействуя через кристаллическую решетку. Они тесно свя-

заны 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 равна:

$$F = \frac{q_1 \cdot q_2}{\varepsilon \cdot r^2}.$$

Значит, если среда такова, что ее диэлектрическая проницаемость ε 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. Поляризация означает скопление положительного заряда вблизи поляризующего электрона. Второй электрон притягивается к области с избытком положительных ионов, т.е. к первому электрону. Первый электрон как бы окутывается облаком положительного заряда, и к этому облаку притягивается второй электрон. Т.о., по теории БКШ, электрон может возбудить колебания кристаллической решетки, которая, в свою очередь, воздействует на этот электрон, и на любой другой электрон. Такое взаимодействие может привести к согласованному движению пары электронов, т.е., вопреки кулоновскому отталкиванию, электроны могут оказаться связанными друг с другом, образуя куперовские пары (по имени Леона Купера, впервые показавшего, что СП-сть в металлах связана с образованием электронных пар). Притяжение относится к той части электронов, которые отвечают за электропроводность, то есть к свободным электронам. Не всякие два электрона способны притягиваться: одним из основных элементов теории БКШ было утверждение, что пару могут создавать только те электроны, у которых импульсы равны по величине и противоположны по направлению, то есть полный импульс пары равен нулю. Но спаренные электроны не образуют единое целое. Размер пары большой, порядка 10^{-6} м. В этом объеме размещается огромное число связанных пар. При очень низких температурах это состояние электронов существует самопроизвольно, потому что выигрыш в энергии превышает потери (потери связаны с тем, что свободные электроны могут утрачивать свою свободу). Вот почему СП-щее состояние устойчиво и для его разрушения необходимо приложить большую энергию. Разность потенциалов, что определяет возникновение тока, не нарушает корреляцию пар: они движутся в одном направлении, с одной скоростью. Но при этом поведение пар отличается от поведения обычных элект-

тронов. Куперовские пары, пока они не разорваны, рассеиваться на решетке не могут, пары движутся сквозь решетку кристалла без всякого сопротивления.

Хотя низкотемпературные СП-ники сразу не нашли широкого применения в энергетике, им все же удалось отвоевать несколько производственных ниш, в которых ежегодная потребность в СП-щем ЭО оценивается в 300 млн. долларов [2, 3]. Наибольшее распространение получил сплав Nb-Ti, в которых СП-мость возникает при 9,6 К (-263,4 °С). Ежегодно в мире производится более тысячи тонн этого вещества [4].

Переход от НТСП-ков к ВТСП-м несет в себе возможность повышения рабочих температур СП-ков вплоть до азотных, замены жидкого гелия на жидкий азот, что упрощает системы криостатирования и сокращает в сотни раз эксплуатационные расходы. Есть два главных направления в применении СП-сти: в магнитных системах различного назначения и в электрических машинах (прежде всего в турбогенераторах). Широкое применение СП-сти в электротехническом оборудовании, как при генерации электроэнергии, так и при ее транспортировке и потреблении, позволит увеличить эффективность использования электроэнергии на 5 – 7%, а, следовательно, практически на эту же величину сократить потребление первичных энергоносителей, которыми в основном являются органические топлива. В результате можно отметить, что новые технологии улучшат экологическую обстановку, что их использование повлияет на все области деятельности, где используется электротехническое оборудование: электроэнергетика, машиностроение, металлургия, горнодобывающая и перерабатывающая промышленность, наземный, морской и воздушный транспорт, атомная промышленность.

Следует ожидать, что наиболее ощутимый эффект принесет комплексное использование СП-го оборудования, например, электростанция или распределительная подстанция полностью состоящая из СП-го оборудования. Хотя перспективно применение и отдельных наименований СП-го оборудования – трансформаторов, токоограничителей, генераторов. 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.

Физики отмечают, что не могут пока объяснить механизм ВТСП-сти. И только признают, что она существует. Свойства ВТСП-ков зависят от химического состава и технологии их изготовления. ВТСП-е устройства более устойчивы к внешним возмущениям, а криогенная система азотного уровня более надежна в эксплуатации, чем гелиевая. Кроме того, использование жидкого азота позволит существенно упростить конструкцию высоковольтной изоляции, т.к. жидкий азот имеет высокую диэлектрическую прочность, сравнимую с диэлектрической прочностью трансформаторного масла.

Повсеместное внедрение СП-ков в промышленность пока ограничивается сложной, дорогой технологией их изготовления. Наиболее простой способ состоит в размоле металлических оксидов, прессования смеси и отжиге в атмосфере кислорода при температуре 900°C . Новое вещество образуется в результате химической реакции. Для устранения межгранулярных прослоек и получения более упорядоченной ориентации кристаллов полученное соединение подвергают плавке с последующим охлаждением. Лучшие СП-щие свойства получаются в пленочных образцах, пропускающих ток $\sim 10^6\text{A}/\text{cm}^2$. Сравнительно небольшие плотности критических токов ВТСП-ков - одна из главных причин, сдерживающих расширение их практического применения. В начале 1987 г. появились сообщения о разработке керамического материала со структурой $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, в котором СП-щее состояние наступает при 93 К в поле до $B_{\text{кр}}=5,7\text{ Тл}$. Такие материалы имеют структуру типа перовскита (минерала CaTiO_3). Наиболее перспективны для промышленного использования висмутовые системы $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$, температура перехода которых из СП-щего состояния в обычное, резистивное, достигает 115 К. Стоимость этого материала в настоящее время около 100 долл. за 1 кА•м. Рост масштабов его производства, совершенствование технологии и раскрытие потенциальных возможностей дают основание ожидать, что в ближайшие годы его цена снизится до 10 – 15 долл. за 1 кА•м. Тогда ВТСП-вые устройства станут конкурентоспособными. Многие технологии построены на использовании серебряных компонентов. Это объясняет высокую стоимость ВТСП-ков. Однако цены и на эти СП-ки за последние несколько лет

упали в 7 – 8 раз, эксперты прогнозируют их дальнейшее снижение [3 – 5].

Учитывая перспективы применения СП-щего оборудования во всех областях электротехники, наиболее важными задачами являются технические проблемы, связанные с правильным выбором материалов для изготовления низкотемпературного оборудования. Поэтому исследование поведения материалов при низких температурах, определение их основных электротехнических характеристик при глубоком охлаждении является важным. Применение СП-ков в электромашиностроении позволяет уменьшить массу и габаритные размеры электрических машин, увеличить предельную мощность и КПД ТГ-ров, получить электродвигатели с минимальным моментом инерции, с малым временем реверса, со специальными характеристиками. Синхронные СП-щие генераторы для ТЭС, АЭС и ГЭС будут иметь на 0,5 – 0,8% более высокий КПД и на 30% меньшие весогабаритные показатели. Применение СП-ти именно в ТГ-рах большой мощности перспективно потому, что для них удастся достигнуть того, что при других технических решениях получить невозможно: уменьшить массу и габариты машины при сохранении мощности. В обычных машинах это уменьшение всегда связано с увеличением потерь и трудностями обеспечения высокого КПД. И наоборот, первые промышленные испытания показали, что в СП-щих ТГ-рах массу можно увеличить в 2 – 2,5 раза, но при этом, в связи с отсутствием потерь в роторе, КПД увеличивается примерно на 0,5% и приближается для крупных ТГ-ов к 99,3%. Повышение КПД ТГ-ров на 0,1% компенсирует затраты, связанные с созданием генераторов на 30%. В этих условиях экономия энергии, получаемая за счет снижения потерь, быстро оправдывает те затраты, которые вкладываются в создание новых СП-щих машин.

Для электрических машин задача выбора материала является первоочередной, т.к. во вращающихся машинах к температурным нагрузкам добавляются механические. Применяемые для их изготовления конструкционные материалы должны обеспечивать надежную работу машин и механизмов в заданных температурных режимах. Высоколегированные стали и сплавы на основе никеля, алюминия, титана, композиционные материалы и пластики получают все большее распространение наряду с применяемыми обычно конструкционными сталями. Чтобы выбрать наиболее подходящий для заданных рабочих условий материал и правильно определить надежность и долговечность изделия, требуются знания физической природы процессов, происходящих в материалах при эксплуатации, а также точные данные об изменениях основных характеристик материалов под воздействием внешних условий. Кон-

структивные особенности якоря (статора) с обмотками переменного тока, отсутствие ферромагнитного материала в зубцовой зоне, наличие или отсутствие ферромагнитного экрана, повышение электрических и тепловых нагрузок из-за «уплотнения» зубцового слоя, вызвали необходимость создания методик расчёта магнитных полей в зоне обмотки якоря и в экранах, разработки новых обмоток переменного тока, схем охлаждения и методик тепловых расчётов.

Применение СП-ков в электрических машинах затруднено в основном потерями на переменном токе. В частности, значительные потери в сверхпроводниках на переменном токе промышленной частоты ограничивают область их применения обмотками, которые имеют практически постоянное поточкоцепление, то есть обмотками возбуждения. В машинах любого класса можно увеличить мощность, повысив ток в витках или напряженность магнитного поля, создаваемого токовыми витками. Однако, есть зависимость предельно допустимого магнитного поля якоря от поля индуктора. В синхронных машинах слишком сильное магнитное поле реакции якоря приводит к настолько высокой реактивности машины, что она выходит из синхронизма во время переходных процессов. В состав СП-щей машины переменного тока входит СП-щий индуктор (оборотный или неподвижный) и якорь с обмотками из нормального металла. Якорь также может быть как неподвижным, так и вращающийся. Обмотка якоря должна быть сконструирована таким образом, чтобы максимально использовалось сильное поле, создаваемое СП-щими обмотки возбуждения. Ферромагнитный материал (если он вообще присутствует в конструкции машины) служит только внешним магнитным экраном.

К настоящему времени известны данные успешных испытаний образцов электротехнического оборудования в СП-вом исполнении, в первую очередь, на базе ВТСП-технологии: электрические машины мощностью в несколько МВА, трансформаторы мощностью до 1,5 МВА, участки кабельных линий электропередачи, рассчитанные на мощность до 440 МВА и т.д. В СП-щем проводе допустима плотность тока в 10...50 раз превышающая плотность тока в обычном ЭО. Магнитные поля в электрических машинах 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 производству допустимой плотности тока на величину индукции магнитного поля, то очевидно, что применение СП-ов уменьшит размеры и массу электрооборудования во много раз [4, 5].

При выборе материала для деталей ротора [4], работающих при низких температурах, основным

критерием является определенное соотношение прочности и пластичности используемых материалов. Кроме того, применяемые материалы не должны обладать хладноломкостью, т.е. склонностью к хрупкому разрушению при понижении температуры. Хладноломкость зависит от кристаллографического строения решетки, химического состава, чистоты и величины зерна металла, а также от наличия концентраторов напряжений, величины градиента напряжения, размеров сечения деталей, конструкции, скорости деформации и степени понижения температуры. Экспериментально показано, что переход материала из пластического состояния в хрупкое при понижении температуры в значительной степени зависит от предела текучести, который имеет тенденцию к возрастанию с понижением температуры. Закон изменения сопротивления материала хрупкому разрушению под действием нормальных напряжений иной, чем закон изменения сопротивления материала сдвигу (с учетом предела текучести) под действием максимальных касательных напряжений. Хладноломкость наступает тогда, когда предел текучести достигает значения сопротивления отрыва. У нехладноломких металлов и сплавов предел текучести с понижением температуры возрастает незначительно, у хладноломких — сопротивление отрыву остается неизменным, либо слабо повышается, в то время как предел текучести повышается значительно и может достигать сопротивления отрыву. Поэтому одним из критериев оценки пригодности материала для работы при низких температурах является интенсивность роста предела текучести в зависимости от понижения температуры. В условиях низких температур не охрупчиваются металлы с гранцентрированной кубической решеткой: медь, никель, алюминий, аустенитные стали с высоким содержанием никеля. Аустенитные нержавеющие стали являются в настоящее время одними из основных конструкционных материалов в криогенной технике. Они имеют высокие значения прочности и сохраняют пластичность и вязкость вплоть до гелиевых температур. Основной сталью этого класса, выпускаемой серийно, является хромоникелевая сталь X18H10T, обладающая высокой ударной вязкостью даже при температуре жидкого гелия и сохраняющая ее после многих лет работы (более 15 лет). При снижении температуры повышается чувствительность к концентрации напряжений при наличии трещин. Разрушение образца при этом произойдет достаточно пластично [4]. Среди основных материалов, работающих при криогенных температурах, аустенитные стали имеют наименьшую теплопроводность, уменьшающуюся с понижением температуры испытания. Поэтому сталь X18H10T нашла широкое применение в элементах конструкции роторов КТГ-15 и КТГ-20.

Характерной особенностью роторов со СП-щей обмоткой возбуждения является значительное количество сварных соединений, поэтому свариваемость материала также имеет большое значение. Сталь X18N10T обладает удовлетворительной свариваемостью, швы имеют хорошую вакуумную плотность, прочность швов составляет не менее 90% прочности основного металла. Сварные швы мало чувствительны к низким температурам и остаются достаточно пластичными до гелиевых температур. В случае, если на конструкцию действуют максимальные рабочие нагрузки при криогенных температурах, следует использовать значительный прирост прочности при охлаждении, наиболее сильно выраженный для сталей аустенитного класса. С этой точки зрения, следует использовать стали типа O3X20N16AG6, обладающие большим запасом вязкости при низких температурах.

Для изготовления крупных поковок роторов турбогенераторов может быть использована сталь O3X13N9G19AM2. Благодаря низкому содержанию углерода, сварные конструкции не нуждаются в термической обработке. Удовлетворительными характеристиками обладает и титановый сплав AT-2. Он имеет малый удельный вес, хорошо проковывается, катается и обрабатывается, а также сваривается. Применение СП-ков в обмотках возбуждения больших синхронных машин позволяет значительно увеличить электромагнитное поле, создаваемое индуктором, при очень малой мощности возбудителя. Ток якоря можно повысить пропорционально полю возбуждения, не доходя до предельных значений реактивности, что обеспечивает стабильность работы. Можно считать, что верхняя граница удельной мощности СП-щих машин будет определяться прочностью конструкции, особенно при к.з. Применение СП-ков для обмоток возбуждения ТГ-ров позволяет получить практически сколь угодно большую мощность возбуждения и при этом полностью устранить потери на возбуждение. Характерной особенностью ТГ-ров со СП-щей обмоткой возбуждения является существенное снижение инерционной постоянной генератора (на 50 – 60% в ТГ-рах на 3000 мин⁻¹ и 60 – 70% в ТГ-рах на 1500 мин⁻¹), что приводит к медленным затуханиям качаний ротора и трудностям с обеспечением прочности валопровода блока в аномальных режимах. Эти трудности могут быть преодолены за счет применения, например, устройства автоматического регулирования момента турбины, а также соответствующего подбора параметров валопровода и снижения величин переходных моментов в генераторе.

Существенные технико-экономические преимущества ТГ-ров со СП-щей обмоткой возбуждения обуславливают целесообразность проведения большого объема исследовательских и опытных

работ по созданию нового типа генератора и связанных с этим затрат. Перспективы применения таких генераторов в энергосистеме, с одной стороны, связаны с их преимуществами, с другой — возможностью обеспечения высокой надежности работы блоков с генераторами со СП-ми обмотками возбуждения. Расчеты показывают, что для обеспечения конкурентоспособности ТГ-ров со СП-ми обмотками возбуждения по сравнению с традиционными генераторами, с учетом их более высокого КПД, вынужденные остановки блока из-за неисправности генератора не должны превышать 40-1000 часов в год. Нет оснований считать, что такой уровень надежности не может быть обеспечен в генераторах со СП-ми обмотками. Однако для достижения требуемой надежности необходимо проведение ресурсных испытаний отдельных узлов и элементов генератора, а также накопление опыта эксплуатации опытных генераторов различной мощности и исполнения.

Хотя преимущества ТГ-ров со СП-щей обмоткой возбуждения в наибольшей мере проявляются в ТГ-рах большой единичной мощности, повышенные технико-экономические показатели при применении СП-мости можно получить даже в генераторах средней мощности. В ТГ-рах мощностью 200÷300 МВт, 3000 мин⁻¹ со СП-щей обмоткой возбуждения по сравнению с ТГ-рами с традиционным охлаждением ротора удастся уменьшить вес примерно в 3 раза, активную длину: на 60 – 70%, внешний диаметр ротора: на 10 – 20%, общую длину ротора примерно на 50% при повышении КПД на 0,5%. Приблизительно такие же результаты дают расчеты и турбогенераторов на 1500 мин⁻¹.

Таблица 1

Сравнение традиционного и СП-вого турбогенератора мощностью 1200 МВА

Свойство, размерность	СП-вый ТГ	Традиционный ТГ
Межфазное напряжение, кВ	26 – 500	26
Линейный ток, кА	27 – 1,4	27,0
Активная длина, м	2,5 – 3,5	6 – 7
Полная длина, м	10 – 12	17 – 20
Наружный диаметр статора, м	2,6	2,7
Диаметр ротора, м	1,0	1,
Длина ротора, м	4,0	8 – 10
Мощность возбуждения, кВт	6,0	5000,0
Вес генератора, т	160 – 300	600 – 700
Полные потери, МВт	5 – 7	10 – 15
Индукция магнитного поля, Тл	5,0	2,0

Необходимость криостатирования СП-ого оборудования создает благоприятные возможности для повышения его надежности. При криогенных тем-

пературах отсутствуют температурные градиенты и соответствующие термомеханические напряжения (в медных обмотках градиенты температуры достигают 80-100 К), практически отсутствует старение высоковольтной изоляции. Поскольку СП-вые электротехнические устройства часто работают в сочетании с полупроводниковыми преобразователями, то можно улучшить рабочие параметры последних при азотных температурах, расположив оба устройства в едином криостатируемом объеме.

Широкое применение СП-сти в электротехническом оборудовании, как при генерации электроэнергии, так и при ее транспортировке и потреблении, позволит увеличить эффективность использования электроэнергии на 5 – 7 %, а, следовательно, практически на эту же величину сократить потребление первичных энергоносителей, которыми преимущественно являются органические топлива. В результате можно отметить, что новые технологии улучшат экологическую обстановку и что их использование влияет на все области деятельности, где используется электротехническое оборудование, - электроэнергетика, машиностроение, металлургия, горнодобывающая, перерабатывающая и атомная промышленность, транспорт [5].

В индустриально развитых странах существуют специальные, финансируемые правительствами программы по развитию и применению СП-х технологий в различных областях деятельности. Как правило, еще на ранней стадии к их реализации привлекается частный капитал производителей и пользователей оборудования. Им передаются научно-технические разработки государственных научных организаций, а сами исследования поддерживаются национальными лабораториями. Показательна, с этой точки зрения, американская программа "СП-сть для электроэнергетики 1996-2000 гг." Ее официальная цель звучит следующим образом: «К 2010 г., периоду наиболее активной замены электроэнергетического оборудования, оработавшего свой ресурс во многих энергосистемах мира, электромашиностроительные фирмы США должны завоевать большую часть мирового рынка, предъявив ему дешевое и компактное СП-ое оборудование, превышающее по эффективности и надежности оборудование резистивного исполнения. Включение СП-вых компонентов в коммерческое электротехническое оборудование призвано обеспечить глобальное стратегическое преимущество промышленности США в XXI в.». Экономический кризис несколько изменил указанные сроки, сместил их на более поздние годы, но основная идея сохранилась. Также следует отметить, что по оценкам Всемирного банка, объем продаж СП-го оборудования возрастет в мире с 2 млрд. долл. в 2000 г. до 244 млрд. долл. в 2020 г. [5, 6].

Выводы

1. Ухудшение экологической обстановки, снижение запасов органического топлива заставляет рассматривать все возможные направления увеличения вырабатываемой электроэнергии. Т.е. должны рассматриваться вопросы снижения потерь в действующих электроустановках. В этом направлении наиболее перспективно использование электрооборудования с ВТСП-ками.

2. Важное направление развития науки - теоретические и экспериментальные исследования СП-х материалов. Необходимы исследования по получению и поиску ВТСП-ов, по становлению теории сверхпроводимости.

3. Есть два перспективных направления в области технического применения СП-сти. Это использование ВТСП-ков для магнитных систем различного назначения и для электрических машин (прежде всего, для СП-вых турбогенераторов).

4. Для СП-вых ТГ-ров большой мощности нужны новые конструктивные решения и материалы. Особое внимание следует уделять развитию теории и практики СП-сти, разработке новых технологических процессов при проектировании и применении СП-щих материалов в электромашиностроении.

5. Открытие неметаллических ВТСП-ов (керамика) и их использование в электротехнических изделиях требуют совершенствования и создания новых технологий изготовления проводников для СП-х изделий, а также работ по изменению собственно конструкций электротехнических изделий: применения беззубцовой зоны статора, специальных конструкций обмоток возбуждения и т.д.

Список литературы

1. Тинкхам М. Введение в сверхпроводимость / М. Тинкхам. – М.: Энергия, 1980. – 356 с.
2. Кошелев П.Ф. Механические свойства сплавов для криогенной техники / П.Ф. Кошелев. – М.: Машиностроение, 1971. – 216 с.
3. Черноплеков Н.А. Сверхпроводниковые технологии: современное состояние и перспективы практического применения / Н.А. Черноплеков // Вестник Российской Академии наук. – 2001. – Т. 71, № 4. – С. 303-319.
4. Черноплеков Н.А. Сверхпроводниковые обмоточные материалы для современной электроэнергетики / Н.А. Черноплеков, Л.И. Чубраева // Проблемы создания и эксплуатации новых типов электроэнергетического оборудования. – 2003. – СПб. ОЭЭП РАН. – Вып. 5. – С. 42-48.
5. Иванов С.С. Сверхпроводимость: от фундаментальной науки к высоким технологиям нового века // Энергия. – 1999. – № 7. – С. 8-14.
6. Шевченко В.В. Предложения по использованию сверхпроводников в электротехнических устройствах / В.В. Шевченко, С.Е. Шевченко, Р.Я. Шуджан // Системы обработки информации. – Х.: ХУПС, 2007. – № 1(13). – С. 96-101.

Поступила в редакцию 25.11.2009

Рецензент: проф. И.Г. Шелепов, Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков.

**АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ РОБОТИ МАТЕРІАЛІВ ПРИ КРИОГЕННИХ ТЕМПЕРАТУРАХ
І ВИБІР МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ НАДПРОВІДНИКОВИХ ТУРБОГЕНЕРАТОРІВ**

В.В. Шевченко, С.В. Підківка, С.Є. Шевченко

У статті проведена оцінка сучасного стану розвитку високотемпературних надпровідників, визначені особливості поведінки матеріалів при глибокому охолодженні, встановлені області найбільш перспективного застосування надпровідників в електротехнічних пристроях, зокрема, в турбогенераторах і в інших елементах електроустаткування.

Ключові слова: надпровідність, технологія, криогенна техніка, електроенергетика, турбогенератор.

**ANALYSIS OF FEATURES OF WORK OF MATERIALS AT CRYOGENICS TEMPERATURES
AND CHOICE OF MATERIALS FOR SUPERCONDUCTING TURBOGENERATORS**

V.V. Shevchenko, S.V. Pidkivka, S.E. Shevchenko

The estimation of modern development status of high temperature superconductors is conducted, the features of conduct of materials are certain at the deep cooling, the most perspective application domains of superconductors are set in the electrical engineering devices, in particular, in turbogenerators and in other elements of electrical equipment.

Keywords: superconductivity, technology, cryogenic technique, electroenergy, turbogenerator.