

В.В. Шевченко<sup>1</sup>, С.Е. Шевченко<sup>1</sup>, Р.Я. Шуджан<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Українська інженерно-педагогічна академія, Харків

<sup>2</sup>Запорізька АЕС

## ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ СВЕРХПРОВОДНИКОВ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ

*На базе анализа современного состояния развития высокотемпературных сверхпроводников, дан краткий обзор развития их практического применения в наиболее энергоемких элементах электротехники, в частности, в электрических машинах и в системах силовой электроники.*

*энергосбережение, атомная энергетика, силовая электроника, электрические машины*

### Введение

**Постановка проблемы.** Современное состояние электроэнергетики и, соответственно, всех отраслей промышленности, транспорта требует немедленного внедрения энергосберегающих технологий: потребность в электроэнергии непрерывно растет, а классические природные источники топлива для тепловых электростанций (уголь, газ, нефть, торф) на грани полной выработки. Атомная энергетика для Украины наиболее перспективна, но также имеет серьезные проблемы – хранение отработанных атомных отходов. Это общая проблема для всего мира. Поэтому непрерывно ведется поиск новых источников энергии, которые сегодня мы называем нетрадиционными: солнечная и ветроэнергетика, энергия гейзеров, приливов, морских и океанических течений, биоэнергетика и т.д. Одновременно следует рассматривать вопросы внедрения технологий и систем с минимальными потерями электроэнергии: применение сверхпроводников и криогенных режимов эксплуатации электрооборудования [1].

**Анализ публикаций.** Материалы, представленные в статье, базируются на данных классических трудов по теории сверхпроводимости (СП-сти), на данных последних исследований, представленных в материалах конференций и научных журналов. Собраны и проанализированы данные о высокотемпературной СП-сти (ВТСП), о проблемах технологии изготовления ВТСП-в, о технических областях их использования [1 – 5].

**Цель статьи.** Оценить современное состояние развития ВТСП, определить области электротехники, где наиболее востребовано и перспективно применение этих СП-ов, определить, где в электротехнических устройствах наиболее перспективно их использование, в частности, в каких типах электрических машин, силовых преобразователей и в других элементах электрооборудования.

### Основной материал

Десятая часть всей производимой в мире электроэнергии пропадает зря, уходит на нагрев медных и

алюминиевых проводов [1, 2]. Между тем, уже почти 100 лет хорошо известно, как избежать этих потерь. Достаточно использовать СП-ники, обладающие при низких температурах нулевым сопротивлением. Электроток, возбужденный в кольце из СП-го материала, способен годами течь безо всякой внешней подпитки. Как уже указывалось [1], промышленные электроустановки с низкотемпературными сверхпроводниками (НТСП), т.е. проводниками с обязательным охлаждением жидким гелием ( $T_K = 4,2$  К) под азотной «рубашкой» для их перехода в СП-щее состояние, нерентабельны из-за высокой стоимости и сложности систем теплозащиты самого гелия. Поэтому шел поиск новых материалов (ВТСП), которые могли бы быть сверхпроводниками при охлаждении только жидким азотом ( $T_K = 77$  К).

В начале 1987 года появились сообщения о разработке керамического материала со структурой  $YBa_2Cu_3O_7$ , в котором СП-щее состояние наступает при 93 К в поле с  $B_{кр} = 5,7$  Тл. Такие материалы имеют структуру типа перовскита (минерала  $CaTiO_3$ ). Плотность тока в системах Y-Ba-Cu-O доведена до  $10^4$  А/см<sup>2</sup>, что пока меньше, чем в металлических СП-никах. Исследователи считают, что перспективны системы на базе висмута  $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_x$ , температура перехода которых в СП-состояние достигает 115 К. Появились первые публикации, в которых (но пока в неофициальной форме) приводятся данные о получении ВТСП с  $T_K = 250$  К. Открытие ВТСП, критическая температура которых превышает температуру кипения жидкого азота, меняет экономические показатели СП-ковых устройств, так как стоимость хладагента и затраты на поддержание необходимой температуры снижаются в 50 – 100 раз. Кроме того, открытие ВТСП сняло теоретический запрет на дальнейшее повышение критической температуры: от 30 К вплоть до комнатной.

Рассчитаем допустимый ток в СП проводнике. Для защиты СП-ка от перенапряжения и разрушения его включают на внешнее разрядное сопротивление:  $R_{раз.} = U_{пер.доп.}/I_{раб.}$ , Ом. Постоянная времени затухания тока в СП-проводнике:

$$\tau = L/R_{\text{раз}} = (2 \cdot W \cdot I_{\text{раб}}) / (U_{\text{пер.доп}} \cdot I_{\text{раб}}^2) = \\ = 2 \cdot W \cdot I_{\text{раб}} \cdot [S(1 - K_3)]^2 / (U_{\text{пер.доп}} \cdot j_0^2), \text{ с,}$$

где  $L$  – индуктивность проводника;  $S$  – сечение проводника;  $K_3$  – коэффициент заполнения сечения СП-ком;  $j_0$  – плотность тока в матрице СП;  $W$  – номинальная мощность электроприемника, МВА. Допустимый ток перегрева СП-ка

$$I_{\text{пер.доп}} = \frac{U_{\text{пер.доп}} [S(1 - K_3)]^2}{2W} \cdot \int_{4.2}^{\theta} \frac{C_p \gamma}{\rho} d\theta,$$

$C_p = (1 - K_3) \cdot C_{\text{матер}} + K_3 \cdot C_{\text{Nb-Ti}}$  – усредненная удельная плотность материалов СП проводника.

Следует помнить, что появление первой теории, объясняющей природу СП-сти, теории БКШ (Бардина-Купера-Шриффера), кроме положительной, сыграло и отрицательную роль в проведении исследований по СП-мости: по этой теории было доказано, что создание ВТСП невозможно: утверждалось, что температурный диапазон существования «куперовских пар», т.е. максимальная критическая температура существования СП-ков, не может превышать 30 К, т.е. при использовании СП-ков охлаждение жидким гелием обязательно. Поэтому интерес к их промышленному применению резко снизился и в конце 70-х – начале 80-х годов сократились государственные и частные ассигнования на исследование СП-сти [1, 2]. Исследования велись, но в значительно меньших объемах, меньшими коллективами исследователей, со значительно меньшей материальной поддержкой.

К счастью оказалось, что, несмотря на то, что эта теория принесла авторам Нобелевскую премию в 1972 г., она оказалась неточна. Она не смогла теоретически объяснить появление СП-мости в открытых позднее СП-щих материалах. С того времени критическая температура повысилась от 30 до 130 – 150 К. От исходных положений теории БКШ сохранилось только определение: СП-мость - это результат синхронного коллективного движения, при котором каждый электрон очень хорошо «чувствует» своих соседей и подстраивается под их движение, т.е. формирует куперовскую пару [1]. В то же время академик В.А. Гинзбург [4] предложил еще один, отличный от теории БКШ, так называемый экситонный механизм образования куперовских пар. Эти теории предсказывали, что СП-сть может существовать даже при комнатных температурах, т.е. при 300 К.

В настоящее время государственные научно-технические программы разных стран предусматривают широкий комплекс работ, включающих в себя фундаментальные и прикладные исследования, направленные на решение проблемы технической реализации ВТСП-сти. На эти исследования в России, США, Канаде, Японии, Китае выделяются серьезные средства как в рамках национальных, так и в рамках международных программ.

В январе 2001 г. на симпозиуме "Transition Metal Oxides", проходившем в японском городе Сентаи, было сообщено о том, что диборит магния  $\text{MgB}_2$  переходит в СП-дящее состояние при рекордно высокой для такого класса соединений температуре 40 К. Это заявление заставило немедленно приступить к изучению этого материала, появилось множество работ различных научных школ, в которых приведены результаты исследований свойств  $\text{MgB}_2$ . Может показаться, что температура в 40 К вовсе не такая большая (в настоящее время получены керамики вида  $\text{Y}_x\text{Ba}_x\text{Cu}_x\text{O}_x$ , сохраняющие СП-дящее состояние вплоть до 150 К). Объясним, почему это соединение ( $\text{MgB}_2$ ) вызвало такой интерес:

1) это простое соединение, как по кристаллографической, так и по электронной структуре, то есть теперь физики-теоретики смогут рассчитать все и попытаются более точно объяснить природу СП-мости, что позволит ее предсказывать в том или ином материале и отказаться от сегодняшней практики обнаружения новых СП-ников методом проб и ошибок или даже случайно;

2) открытие СП-сти  $\text{MgB}_2$  подтверждает теорию БКШ и, в то же время, опровергает ее, смещая определенный ею предел температуры от 30 до 40 К. Подтверждением теории, в то же время, было обнаружение изотопического эффекта – одного из первых важных открытий, сделанных сразу же после определения СП-мости  $\text{MgB}_2$ . Этот эффект заключается в том, что температура перехода в СП-щее состояние зависит от того, какой изотоп бора используется:  $\text{B}^{10}$  или  $\text{B}^{11}$ . Изотопы одного элемента, как известно, имеют идентичное электронное строение, а отличаются лишь массами. Значит, изотопический эффект – это по сути наблюдение зависимости  $T_c$  от массы атомов, что и предсказывается теорией БКШ [1];

3) из всех соединений у  $\text{MgB}_2$  самая высокая температура перехода в СП-щее состояние ( $T_c$ ). Это связано с тем, что атомы бора очень легкие, а в теории БКШ сказано, что чем легче атомы, тем дольше сохраняется СП-мость;

4) важно и то, что  $\text{MgB}_2$  - давно известное и хорошо изученное вещество. Получение его, в отличие от керамик, не представляет трудностей.

Атомы бора в  $\text{MgB}_2$  образуют кристаллическую структуру соединения – шестиугольные "соты", очень напоминающие графитовые плоскости. Отличие от графита в том, что в  $\text{MgB}_2$  плоскости находятся прямо одна над другой, а в графите – несколько сдвинуты. Кроме того, есть еще и атомы магния, находящиеся в "сотах". Вычисления показывают, что эти атомы находятся в сильно ионизованном состоянии, близком к  $\text{Mg}^{++}$ . Будучи положительно заряженными, они как бы "вытягивают" электроны из борных плоскостей в межплоскостное пространство. Это приводит к созданию свободных носителей заряда, т.е. к проявлению металлических свойств  $\text{MgB}_2$  и существованию СП-мости.

В настоящее время широкое внедрение ВТСП-в ограничивается:

1) требованием сохранения СП-сти при больших плотностях тока;

2) необходимостью обеспечения высокой механической прочности и достаточной гибкости проводниковых и кабельных изделий, несущих и вращающихся элементов машин и механизмов;

3) необходимостью выдерживать большие магнитные, токовые и центробежные нагрузки, должны легко обрабатываться, иметь стабильные свойства;

4) СП-ники должны иметь цену, рентабельную для предприятий.

Инженеры и ученые всех стран отмечают, что в настоящее время основная проблема для внедрения в промышленность СП-никовых электроустановок сложные технологии изготовления СП-щих проводников и кабелей. Работы в этом направлении ведутся непрерывно [3 – 5], и уже можно отметить, что сильноточные СП-ковые технологии вышли на новый уровень.

Наиболее простой способ состоит в размоле, прессовании смеси и отжиге в атмосфере кислорода при температуре 900°C металлических оксидов. Новое вещество образуется в результате химической реакции. Лучшие СП-щие свойства получаются в пленочных образцах, пропускающих ток до  $10^6 \text{ А/см}^2$  [1, 2], т.е. в образцах, полученных путем напыления или другим путем получения пленочных покрытий. Провода также производятся методом "порошок в трубе": заготовки из серебряной трубки, заполненной порошкообразным ВТСП-ком, подвергают термомеханической и химической обработке, затем опрессовкой получают ленту с сечением  $4-0,3 \text{ мм}^2$  и длиной до 1000 м. Существуют и другие методы получения ВТСП.

Использование ВТСП-в означает, что возможно создание нового поколения электроэнергетического оборудования (безрезистивного), существенно превосходящего оборудование традиционного (резистивного) исполнения: за счет более высокой эффективности имеем уменьшение в 2 – 3 раза массогабаритных показателей и, соответственно, материалоемкости и энергозатрат на изготовление. Его использование позволит обеспечить повышение надежности и увеличение срока службы, улучшить качество энергосистем, их экологическую чистоту при эксплуатации. Важным аргументом для внедрения СП-вого оборудования в промышленность является снижение капитальной стоимости при его массовом производстве и уже достигнутой цене ВТСП-ков, не превышающей 10 – 15 долл. за  $1 \text{ кА} \cdot \text{м}$  [4]. К настоящему времени прошли успешные испытания опытные образцы электрооборудования со СП-щими обмотками: электромашин мощностью 1 – 10 МВт и системы управления ими; трансформаторы мощностью до 1,5 МВА; участки кабельных линий электропередачи, рассчитанные на мощность до 440 МВА; СП-вые токоограничители и накопители энергии МВА-диапазона.

Для примера, на рис. 1, проведено сравнение габаритов обычных машин и машины со СП-обмотками. Видно, что по габаритам СП-щий двигатель в 9 – 10 раз компактнее обычного, «теплого».

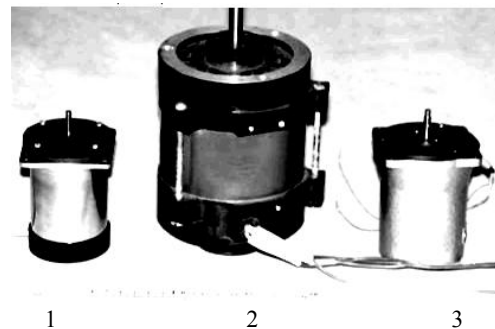


Рис. 1. Сравнение габаритов ВТСП-его и традиционных электродвигателей:

1 – электродвигатель 100 Вт со ВТСП-ми обмотками;  
2 – обычный 100 Вт; 3 – обычный 12 Вт

Мы не считаем, что процесс вхождения нового электрооборудования будет взрывным, скорее, он будет эволюционным, но с заметной скоростью нарастания [1]. Широкое применение СП-вого оборудования, 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, которым является органическое топливо. Это снизит выброс парниковых газов в атмосферу, т.е. общую нагрузку на окружающую среду, сократит уничтожение природных запасов газа, угля, нефти, торфа.

Внедрение новой технологии использования СП-ков непосредственно коснется всех областей, где используется электротехническое оборудование, – электроэнергетики, машиностроения, металлургии, горнодобывающей и перерабатывающей промышленности, наземного, морского и воздушного транспорта, атомной промышленности. Очевидно, что наиболее перспективно комплексное использование СП-вого оборудования, например, полностью укомплектованные электростанции, технологические комплексы, электроприводные системы, системы электроснабжения. Это снижает стоимость затрачиваемой электроэнергии, повышает надежность работы оборудования и улучшает экологическую ситуацию. Но и единичные виды СП-го оборудования: трансформаторы, кабели, электродвигатели и генераторы могут улучшить ситуацию в существующих энергосистемах, увеличить их устойчивость, надежность и пропускную способность. В индустриально развитых странах существуют специальные правительственные программы по развитию и применению СП-щих технологий в различных областях деятельности. Такие программы есть в США, Японии, в

Европейском сообществе, к их реализации привлекается частный капитал будущих производителей и пользователей оборудования. Например, согласно американской программе "СП-мост для электроэнергетики 1996 – 2000 гг.", указано, что с 2010 – 2015 гг. электромашиностроительные фирмы США планируют массово выбросить на мировой рынок дешевое, компактное, эффективное и надежное СП-овое оборудование. Это период наиболее активной замены отработавшего свой ресурс электроэнергетического оборудования. Такая коммерческая «атака» призвана обеспечить глобальное стратегическое преимущество промышленности США в XXI в.

Отметим наиболее интересные направления промышленного использования СП-ков.

**1. Турбогенераторы.** Применение СП-ников в электромашиностроении позволяет уменьшить массу и габаритные размеры электрических машин, увеличить предельную мощность и КПД турбогенераторов, получить электродвигатели с минимальным моментом инерции, с малым временем реверса, со специальными характеристиками. СП-щие системы возбуждения могут увеличить КПД генераторов большой мощности до 99,5%, в то время, как у обычных турбогенераторов он не более 98,6%. Ежегодная экономия топлива при этом составит 1%. Наиболее перспективно применение СП-ти в турбогенераторах большой мощности, где удается достигнуть того, что при других технических решениях получить невозможно: уменьшить массу и габариты машины при сохранении мощности. Уже освоены энергоблоки мощностью 500 и 800 МВт, на стадии изготовления находятся блоки мощностью 1500, а для более далекой перспективы (к 2010 г.) анализируются возможности доведения единичной мощности турбогенератора до 2500 – 3000 МВт на базе обычной конструкции в четырехполюсном исполнении. В обычных машинах это уменьшение всегда связано с увеличением потерь и трудностями обеспечения высокого КПД. Модельные и первые промышленные испытания показали, что в турбогенераторах со СП-щими обмотками возбуждения и статора массу можно уменьшить в 2 – 2,5 раза. В тоже время, из-за отсутствия потерь в роторе, КПД увеличивается примерно на 0,5% и приблизится для крупных турбогенераторов к значению 99,3%. Повышение КПД турбогенераторов, даже на 0,1%, компенсирует затраты, связанные с созданием генераторов, на 30%. В этих условиях экономия энергии, получаемая за счет снижения потерь, очень быстро оправдывает те затраты, которые вкладываются в создание новых СП-х машин. При этом нужно решать проблемы подбора новых материалов, разработки соответствующих технологий, обеспечения высокой надежности [3].

**2. Линии электропередач и кабельные сети.** Экономически рентабельными СП-ковые линии электропередач могут стать только при передаче по ним большого количества энергии. В 2005 г. группа

китайских разработчиков (CAS, IEE, TIPC) и компания American Superconductor объявили об успешной демонстрации 76-метрового 3-фазного кабеля с теплым диэлектриком в действующей сети. С декабря 2004 года по апрель 2005 года данный кабель с напряжением 6,6 кВ питал заводы компании Changtong Power Cable в городе Байин (Китай). Для подвода электроэнергии к одному из кварталов Детройта (США) был проложен СП-щий кабель; примеру Детройта собираются последовать и некоторые другие американские города.

К середине 80-х годов 20 века стали отмечать разрыв между пропускной способностью обычных кабелей и растущей потребностью в передаваемых мощностях. Одним из направлений решения этой задачи стало применение НТСП-кабелей. Однако огромным минусом, сдерживающим применение этих кабелей, было обязательное условие охлаждения жидким гелием, т.к. НТСП-кабели работали только при очень низкой температуре (жидкий гелий  $T_K = 4,2$  К под защитой жидкого азота  $T_K = 77$  К). Открытие в 1986 году Беднорцем и Мюллером ВТСП, имеющих рабочую температуру выше 77 К, дало новый толчок развитию кабелей, использующих явление СП-сти [3].

С полной уверенностью можно сказать, что ВТСП-кабели, по сравнению с обычными, обладают меньшими потерями, большей пропускной способностью даже при снижении напряжения. При одинаковой мощности по сравнению с обычным кабелем, ВТСП-кабель более компактен и имеет низкий вес, что облегчает транспортировку и монтаж, для него требуется меньшее количество муфт, уменьшается площадь прокладки, они экологичны и пожаробезопасны. Особенность внутреннего охлаждения ВТСП-кабелей (с помощью только жидкого азота) позволяет избежать нагрева электрической изоляции.

Японская компания The Furukawa Electric Co, в сотрудничестве с организацией по развитию новых энергетических и промышленных технологий - New Energy and Industrial Technology Development Organization, создала СП-щий материал для производства силовых кабелей, способных передавать мощности, в 100 раз превышающие мощности, передаваемые по традиционным кабелям с медными жилами. Важно, что стоимость производства этих кабелей почти не превышает стоимость производства обычных кабелей. При этом следует учитывать, что 90% стоимости кабеля – это стоимость ВТСП-материала. Жилы, образующие новый кабель, выполнены из тонкой плёнки ВТСП-шего материала типа иттрия, слоями наложенного на никелевую основу. Двадцать таких СП-ков были соединены вместе в экспериментальный кабель длиной 1 м, с пропускной способностью до 1450 А. В настоящее время компанией Furukawa ведутся работы по созданию СП-го кабеля длиной 500 метров. Обычно такие кабели достаточно дорогие, т.к. в таких СП-ках присутствует большое количество серебра. Компания планирует,

что изготовленный ею кабель будет готов примерно к 2015 г., к тому времени, когда в Японии планируется модернизировать большинство высоковольтных силовых линий, проложенных в 70-е и 80-е годы. Furukawa собирается предложить свой кабель на рынок для электроэнергетических компаний, как в Японии, так и за рубежом, для передачи больших объемов дешёвой электроэнергии. Есть основания полагать, что в ближайшие годы разработчики и производители СП-ковых материалов разных стран добьются снижения цены в несколько раз. Тогда и станет очевидной выгода разработки и применения ВТСП-кабелей. На рис. 2 и 3 приведены два варианта возможного исполнения кабелей с ВТСП-жилой: с холодным и с теплым диэлектриками. Несмотря на простоту конструкции, монтаж такой линии сопряжён со значительными трудностями: надо обеспечить герметичность кабеля, научиться собирать его из отдельных коротких отрезков; разработать рефрижераторы, концевые устройства и другое оборудование, необходимое для стабильной работы таких линий передач.

Наиболее перспективные направления внедрения ВТСП-кабелей:

- 1) глубокие вводы в мегаполисы (например, Москва, Санкт-Петербург, Киев и т.д.) и крупные энергоёмкие комплексы (металлургические, нефтеперерабатывающие и т.д.), что позволит не только увеличить передаваемую мощность, но и отказаться от подстанций высокого напряжения в пользу среднего;
- 2) связи между энергетическими системами, высокоточные токопроводы;
- 3) ЛЭП постоянного тока;
- 4) переключки между воздушными ЛЭП при прохождении водных преград (изоляция обычных кабелей в данных условиях может перегреваться, что уменьшает их пропускную способность на 30 – 40%).



Рис. 2. Конструкция ВТСП-кабеля с холодным диэлектриком: 1 – жидкий азот; 2 – жидкий азот; 3 – ВТСП-токопроводящая жила; 4 – диэлектрик; 5 – ВТСП-экран; 6 – криостат; 7 – оболочка



Рис. 3. Конструкция ВТСП-кабеля с теплым диэлектриком: 1 – жидкий азот; 2 – ВТСП-токопроводящая жила; 3 – криостат; 4 – оболочка; 5 – экран

В кабеле с холодным диэлектриком (рис. 2) элемент кабеля окружен коаксиальным СП-щим слоем, предназначенным для экранировки магнитного поля. Диэлектрик, «пропитанный» жидким азотом, располагается между токопроводящей жилой (из ВТСП-материала) и внешним экранирующим слоем.

Преимуществом такой конструкции является устранение потерь от переменного тока, вызванных воздействием магнитного поля, а также вихревыми токами, наведенными в металлических частях соседнего оборудования. В кабелях с теплым диэлектриком (рис. 3) нет такого СП-го слоя. Данная конструкция требует меньшего расхода СП-го материала, применяются обычные изоляционные материалы, поэтому стоимость этих кабелей существенно ниже. ВТСП-кабели всё чаще устанавливаются в действующие сети. Стоит ожидать, что лет через 5 они будут применяться наряду с обычными кабелями, постепенно вытесняя их из электроэнергетики, как устаревшие.

Помимо других сложных вопросов, возникает необходимость в существенном повышении номинального напряжения. Применение чистых металлов, охлажденных до 15 – 20 К, а главное, СП-ников представляется одним из возможных путей развития будущей электротехники больших мощностей.

**3. Поезда на магнитной подушке** – наиболее перспективное применение СП-ников для скоростных поездов. Стоимость сооружения пути длиной 500 км обойдется в 1,5 – 4,5 миллиардов долларов. Стоимость самих поездов составит не более 10% от общей суммы затрат, а система охлаждения всего 1%.

**4. Использование СП-ков для получения сверхсильных постоянных магнитных полей.** СП-щий соленоид, в отличие от обычного, не нуждается во внешнем источнике питания, поскольку однажды возбуждённый в нём ток не затухает.

Сильные электромагнитные поля особенно важны в установках для получения управляемой термоядерной реакции: плазма может удерживаться во взвешенном состоянии в мощных электромагнитных полях. Необходимые для этого магнитные поля столь велики, что их создание экономически оправдано только при использовании СП-щих магнитов.

**5. СП-щие накопители энергии с охлаждением жидким  $N_2$**  обошлись бы на 3% дешевле, чем обычные, а капитальные затраты уменьшаются еще на 5%.

**6.** В современной электротехнике все шире используется явление **криопроводимости**, т. е. достижение металлами весьма малого значения удельного сопротивления при криогенных температурах, но без перехода в СП-щее состояние. Такие металлы называются криопроводниками. Наиболее часто это чистые Cu и Al (марки А999 с 0,001% примесей), Вг (0,1% примесей).

Применяются криопроводники в основном для изготовления жил кабелей, проводов, работающих при температурах жидкого  $H_2$  ( $-252,6^{\circ}C = 20,4 K$ ), Ne ( $-245,7^{\circ}C = 27,3 K$ ) и  $N_2$  ( $-195,6^{\circ}C = 77,4 K$ ).

Применение криопроводников, вместо СП-ников, в электротехнических устройствах может иметь свои преимущества. Использование в качестве хладагента жидкого  $H_2$  или жидкого  $N_2$  (вместо жидкого гелия, который значительно дороже других хладагентов) упрощает и удешевляет выполнение тепловой изоляции устройства и уменьшает расход мощности на охлаждение. При случайном повышении температуры или магнитной индукции свыше значений, соответствующих переходу СП-ника в нормальное состояние, СП-мость будет нарушена. Это приведет к внезапному освобождению большого количества энергии. Для криопроводящей цепи такой опасности нет, так как повышение температуры может повлечь за собой лишь постепенное, плавное увеличение сопротивления.

### Выводы

1. Современное состояние электроэнергетики, промышленности, транспорта требует немедленного внедрения энергосберегающих технологий и систем с минимальными потерями электроэнергии. Применение сверхпроводников и криогенных режимов эксплуатации электрооборудования – одно из наиболее перспективных направлений развития электротехнических устройств и, в первую очередь, электрических машин.

2. До настоящего времени нет окончательно сформированной физической теории, объясняющей явление СП-сти. Необходимо продолжать работы по созданию единой теории, объясняющей это явление, что поможет целенаправленно получать новые ВТСП-ки.

3. Практически важным направлением в развитии практической СП-сти является развитие существующих и создание новых технологий изготовления СП-ков.

4. Наибольший экономический эффект следует ожидать от использования СП-сти в электромаши-

ностроении при изготовлении крупных электрических машин. Целесообразно использовать явление СП-сти или криогенного охлаждения проводников для всего комплекса оборудования, входящего в систему обеспечения работы электрического двигателя или генератора.

5. Среди ближайших технических задач, входящих в круг работ по практическому использованию СП-сти и криогенного охлаждения, является установление рентабельных областей применения каждого из этих явлений.

### Список литературы

1. Шевченко В.В., Гавриш А.Ю. Современное состояние и перспективы применения сверхпроводников в электроэнергетике // Системы обработки информации. – Х.: ХУПС, 2005. – Вып. 5 (45). – С. 194-204.

2. Глебов И.А., Данилевич Я.Б., Мамиконянц Л.Г. Проблемы генераторостроения на всемирном электротехническом конгрессе // Электричество. – 1977. – № 12. – С. 37-41.

3. Черноплеков Н.А., Чубраева Л.И. Сверхпроводниковые обмоточные материалы для современной электроэнергетики // Проблемы создания и эксплуатации новых типов электроэнергетического оборудования. – С.-Пб.: ОЭЭП РАН. – 2003. – Вып. 5. – С. 27-31.

4. Черноплеков Н.А. Сверхпроводниковые технологии: современное состояние и перспективы практического применения // Вестник РАН. – 2001. – Т. 71, № 4. – С. 303-319.

5. Кузьмин В.В. О нетрадиционном сценарии развития электроэнергетики в 21-м веке // Новини енергетики. – 1999 – № 2. – С. 47-51.

Поступила в редколлегию 5.12.2006

**Рецензент:** проф. В.П. Соляник, Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков.