

## ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ФІЗИЧНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

УДК 537.312.62 : 621.313.322

### СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СВЕРХПРОВОДНИКОВ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

В.В. Шевченко, А.Ю. Гавриш  
(Украинская инженерно-педагогическая академия)

*ан краткий обзор развития теории сверхпроводимости, технического применения различных сверхпроводников в электротехнике за последние 30 лет. Рассмотрено современное состояние и перспективы использования высокотемпературных сверхпроводников в электротехнических изделиях, в частности, в турбогенераторах.*

*сверхпроводник, сверхпроводимость, турбогенератор*

**Постановка проблемы.** Открытие в последние годы новых сверхпроводящих (СП-х) материалов вновь сделало актуальным рассмотрение возможности перевода электротехнических изделий резистентного типа к электротехническим установкам без потерь в токовых цепях. Также необходимо определить тип сверхпроводников (СП-в), наиболее перспективных для промышленного использования. Знание механизма появления СП-сти позволит более правильно определить перспективы и темпы развития этого направления, области практического использования СП-ов в физических установках и в электромашиностроении.

**Анализ публикаций.** При работе над статьей рассмотрены как классические труды по теории сверхпроводимости (СП-сти), так и данные по последним исследованиям, полученным из материалов конференций и научных журналов. В них приведены данные о достигнутых границах физических параметров СП-в различных поколений, о теоретических моделях появления СП-сти, о технических областях использования СП-ков [1 – 6].

**Цель статьи** – систематизировать данные по существующим СП-ам с оценкой перспектив их использования в электроэнергетических устройствах, в частности, в турбогенераторах.

В настоящее время в электротехнике и, в частности, в электроэнергетике, наблюдается вторая волна активизации внимания в вопросу использования СП-ов в электротехнических установках [1]. Предыдущий (первый) этап активных исследований СП-сти и попыток практического использования СП-ов следует отнести к концу 60-х, к 70-м годам 20 века. К этому периоду относятся и первые разработки по созданию электротехнического оборудования сильно- и слаботочного диапазона с использованием СП-ов в качестве токнесущих элементов (например, обмоток электрических машин и аппаратов, соленоидов, кабелей ...).

Получив в 1908 г. жидкий гелий, ( $T_K = 4,2$  К), Г. Камерлинг-Оннес из Лейденского университета (Нидерланды), измеряя сопротивление чистой ртути, погруженной в жидкий гелий, обнаружил (1911 г., Нобелевская премия 1913 г.), что при этой температуре сопротивление ртути падает до нуля. Г. Камерлинг-Оннес понимал всю ответственность открытия, неоднократно, с различным оборудованием и точностью повторял опыт. Но он действительно открыл явление СП-сти – исчезновение активного сопротивления материала при снижении температуры до определенного значения. Эта температура была названа критической  $T_K$ . Первые исследования проводили с чистыми металлами. В дальнейшем чистые металлы (кроме ниобия и некоторых других) из-за их особого поведения в магнитных полях, механизма перехода в нормальное состояние из сверхпроводящего были объединены в особую группу – СП-ки 1-го рода [2].

Сверхпроводящее состояние материала ограничивается областями критических значений температуры ( $T_K$ ) и напряженности магнитного поля ( $H_K$ ). Связь между этими критическими параметрами для СП-ков 1-го рода может быть с достаточной степенью точности описана:

$$H_K = H_0 \cdot [1 - (T/T_K)]^2,$$

где  $H_0$  – критическое поле проводника при  $T = 0$  К.

Следующее важное открытие было сделано в 1933 г. немецким физиком В. Мейсснером и его сотрудником Р. Оксенфельдом. Они обнаружили, что если цилиндрический образец поместить в продольное магнитное поле и охладить ниже температуры  $T_K$ , то он полностью выталкивает из себя магнитный поток, т.е. оказалось, что СП-ки первого рода – идеальные диамагнетики. Эффект Мейсснера, как назвали это явление, был важным открытием, поскольку, благодаря ему, физикам стало ясно, что СП-сть – квантовомеханическое явление. В 1935 г. братья Ф. и Г. Лондоны предложили рассматривать СП-сть, как макроскопический квантовый эффект (с расстояниями до  $10^{-6}$  м, а не до  $10^{-10}$  м, как в классической квантовой физике), что позволило для исследования теории СП-сти использовать не классические уравнения электромагнитного поля Дж. Максвелла, а их модификацию. Эти преобразованные уравнения описывали и эффект Мейсснера, и зависимость

температуры  $T_K$  от массы атомов кристаллической решетки (изотопический эффект), и собственно СП-ть, и ограничения по глубине проникновения поля, т.е. идеальный диамагнетизм СП-ов. Открытие изотопического эффекта указало на то, что СП-ть, вероятно, вызывается особым типом взаимодействия между электронами проводимости и атомами кристаллических решеток [2].

Позже были открыты СП-ки 2 рода, в которые внешнее магнитное поле может входить хотя бы частично. Это сплавы и соединения металлов, в частности, с медью и неметаллами. Термин «СП-ки 2-го рода» введен в 1952 г. советским ученым А.А. Абрикосовым, развившим теорию СП-сти Гинзбурга – Ландау. Термин оказался необходим для определения СП-ов с отрицательной поверхностной энергией, в отличие от СП-ов 1-го рода, у которых поверхностная энергия на границе сверхпроводящей и нормальной фаз положительна. Отрицательная поверхностная энергия может быть, если так называемый параметр Гинзбурга – Ландау больше  $1/\sqrt{2}$ . Такие СП-ки сохраняют СП-сть даже в очень сильных магнитных полях, характеризуются большой глубиной проникновения (около  $2-10^{-7}$  м) и малой длиной когерентности ( $5-10^{-9}$  м). В присутствии слабого магнитного поля (меньше  $5 \cdot 10^{-2}$  Тл) весь магнитный поток выталкивается из сверхпроводника 2-го рода. Но выше  $H_{C1}$ , первого критического поля, – магнитный поток проникает в образец, хотя и в меньшей степени, чем в нормальном состоянии. Это частичное проникновение сохраняется до второго критического поля –  $H_{C2}$ , которое может превышать 10 Тл. При полях, больших  $H_{C2}$ , поток проникает полностью и вещество становится нормальным.

Свойства СП-ов II-го рода не объяснялись теорией БКШ, (Бардина – Купера – Шриффера, 1957 г., США, Нобелевская премия 1972 г.), которая являлась практически первой завершенной, научной теорией, объяснявшей явление СП-ти: электроны при определенных энергетических состояниях всей атомарной структуры материала притягиваются друг к другу, «собираются» в связанное состояние, т.е. образуют связанные (куперовские) пары, перемещающиеся в кристаллической решетке. В  $1 \text{ см}^3$  вещества формируется примерно  $10^{20}$  таких куперовских пар. Теория БКШ также объясняет, почему хорошие проводники, такие, как медь и золото, не являются СП-ками: электроны проводимости в этих веществах легко проходят сквозь атомную решетку, почти не взаимодействуя с ней. Это делает такие материалы хорошими электрическими проводниками, поскольку в них теряется мало энергии из-за рассеяния решеткой, но для достижения СП-щего состояния необходимо сильное взаимодействие между атомами решетки и электронами. Поэтому очень хорошие проводники электричества, как правило, не бывают СП-ками. На разрыв куперовских пар требуется затратить некоторую энергию. В результате этого энергия связанных электронов на некоторое значение меньше энергии нормальных электронов. Эту разницу называют энергетической

щелью. Это так называемый фотонный механизм образования куперовских пар. Теория БКШ имела и недостатки: во-первых, она была статической и, во-вторых, согласно этой теории, металлы могут быть СП-ками (1972 г.!) только до температур 50 К [2]. Это открытие значительно снизило интерес к СП-сти, как возможному направлению в развитии электротехники. Получение таких температур было возможно практически только за счет охлаждения их сжиженным гелием ( $T_{\text{Кгел}} = 4,2 \text{ К}$ ). А он, в свою очередь, требовал тепловой защиты жидким азотом ( $T_{\text{Казот}} = 77 \text{ К}$ ). Это было дорого, сложно, к тому же СП-ки вели себя неустойчиво – они возвращались в «нормальное», резистентное состояние при протекании токов с большей некоторого значения плотностью, с попаданием в электромагнитные поля.

Любые теоретические исследования должны хотя бы в перспективе предполагать практическое применение. Установление предела существования СП-сти в 50 К, т.е. вне зоны возможного охлаждения жидким азотом, значительно снизило интерес инвесторов к исследованиям. Однако, известно, что уже в 60 – 70-е годы в ряде стран (США, Япония) явление СП-сти при достаточно высоких температурах, значительно выше 77 К, было открыто в соединениях типа мыла (соли высших карбоновых кислот). И хотя трудно было представить способ применения этих соединений в электротехнических изделиях, их открытие позволило предположить существование иных механизмов образования куперовских пар, т.е. СП-сти.

Работы по теории СП-сти продолжались. Для развития динамической модели стали предполагать, что второй электрон движется по поляризованному следу первого электрона. При этом возможны две ситуации: первая – импульсы электронов одинаковы по величине и направлению, то есть они образуют пару частиц с удвоенным импульсом, вторая – импульсы электронов одинаковы по величине и противоположны по направлению. Такую корреляцию электронов также можно рассматривать, как пару с нулевым импульсом. Если электроны, кроме того, будут иметь противоположные спины, то такая пара будет обладать уникальными свойствами. Сложность рассматриваемой задачи была связана еще и с тем, что образование куперовских пар приводит к изменению квантово-механических состояний неспаренных («нормальных») электронов, [2].

Распределение электронов в нормальном металле описывается функцией Ферми-Дирака

$$f(E) = (e^{(E - \mu)/(k^*T)} + 1)^{-1},$$

где  $k$  – постоянная Больцмана;  $\mu$  – химический потенциал.

При температуре  $T = 0 \text{ К}$  полная функция распределения  $N(E) = f(E)g(E)$ , определяющая число частиц с энергией  $E$ , равна плотности числа состояний  $g(E)$ , так как  $f(E) = 1$ :

$$g(T) = ((4\pi V) / n^3) \cdot (2m)^{3/2} \cdot E^{1/2}.$$

Взаимодействие электронов в СП-ках с образованием куперовских пар приводит к тому, что небольшая область энергии вблизи уровня Ферми становится запрещенной для «нормальных» электронов – возникает энергетическая щель. В пределах этой щели нет ни одного разрешенного для неспаренных электронов энергетического уровня. Под влиянием взаимодействия между электронами, имеющими энергию, близкую к  $E_f$ , они оказываются как бы сдвинутыми относительно уровня Ферми (рис. 1, б). При  $T = 0$  К ширина щели максимальна ( $2d(T) = 10^{-2} - 10^{-3}$  эВ), а все свободные (неспаренные) электроны находятся под щелью (на уровне с энергией меньше  $E_f$ ). При повышении температуры часть куперовских пар разрушается, а некоторые неспаренные электроны "перескакивают" щель и заполняют состояния с энергией больше  $E_f$ . Ширина щели  $2d(T)$  при этом уменьшается (рис. 2).

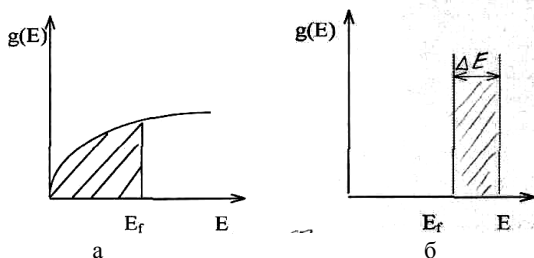


Рис. 1. Плотность различных состояний электронов в резистентном металле и в СП-ке, занятое состояние заштриховано: а – плотность состояний электронов в нормальном металле при  $T = 0$ ; б – плотность состояний неспаренных электронов в СП-ке

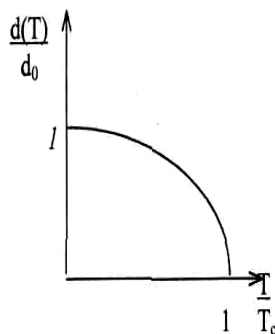


Рис. 2. Зависимость ширины энергетической щели от температуры

Для крупных технологических установок, крупных магнитных систем, (табл. 1): соленоидов, обмоток возбуждения электрических машин и т.д., – нашли применение именно сверхпроводники 2-го рода. Переход в нормальное состояние этих СП-ов идет в широком диапазоне изменений напряженности магнитного поля. Между максимальной (при  $T = 0$  К) шириной щели  $2d_0$  и критической температурой  $T_K$  существует прямая зависимость. По теории БКШ, удовлетворительно согласующейся с экспериментальными данными, для большого числа сверхпроводников (кроме Nb, Ta, Pb, Hg):

$$2d_0 = 3,5 \cdot k \cdot T_C, \text{ эВ}$$

Рассмотренная теория позволяла расширить температурный предел существования СП-сти.

В 1964 г. американец В. Литтл предположил существование механизма, при котором электроны могли бы взаимодействовать, индуцируя электрический заряд на длинных органических молекулах, В то же время ака-

демик В.А. Гинзбург предложил еще один, 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 1979 г. исследователи Института общей и неорганической химии АН СССР им. Н.С. Курнакова получили новую лантан-стронциевую и лантан-бариевую керамику. Эта керамика проводила ток, как обычный металл и ее электросопротивление, как и полагалось, снижалось с понижением температуры. В апреле 1986 г. ученые Цюрихского филиала фирмы ИБМ в Швейцарии Дж. Беднорц и А. Мюллер, исследуя ту же керамику, но при более низких температурах, обнаружили в ней СП-сть при 30 К. В марте 1987 г. на общемосковском семинаре физиков, проводящемся в ФИАН под руководством В.Л. Гинзбурга, начальник лаборатории А.И Головашкин сообщил, что для одного из керамических образцов удалось получить температуру СП-го перехода  $T_K = 102 \text{ К}$  [3].

Таблица 1

Области возможного использования СП-сти в технике

Применение	Примечания
<b>Общегосударственное использование</b>	
1. Экранирование магнитных полей и электромагнитных излучений	СП-к не пропускает магнитный поток, следовательно, он экранирует электромагнитное излучение. Используется в микроволновых устройствах и в качестве защиты от излучения при ядерном взрыве.
<b>Сильноточные физические устройства</b>	
2. Магниты, научно-исследовательское оборудование	НТСП магниты используются в ускорителях частиц и установках термоядерного синтеза.
3. Магнитная левитация	Работы по созданию поездов на магнитной подушке. Прототип с использованием низкотемпературных СП-в (НТСП) – в Японии (с 70-х годов 20 в.)
<b>Другие применения (электротехника)</b>	
4. Передача энергии	Прототипные линии НТСП существуют
5. Аккумулирование энергии	Возможность аккумулировать электроэнергию в виде циркулирующего тока
6. Вращающиеся электрические машины	Использование СП-ов для крупных электрических машин переменного тока (например, турбогенераторов)
7. Вычислительные устройства	Комбинация полупроводниковых и СП-щих приборов при конструировании аппаратуры.

Таким образом, итогом 40-летнего развития СП-й технологии гелиевого уровня температур стали выдающиеся результаты, полученные при создании уникальных электрофизических установок, и первые коммерческие успехи, но, эта технология не смогла существенно повлиять на облик промышленной электроэнергетики. Положение радикально изменилось в 1986 г., когда были открыты так называемые высокотемпературные сверхпровод-

ники (ВТСП) с критическими температурами перехода в СП-е состояние, быстро достигшими величин, заметно превышающих 77,3 К (рис. 3), то есть температуру кипения жидкого азота при нормальном давлении. Появилась возможность, вместо невозобновляемого и дорогого хладагента (жидкого гелия) использовать жидкий азот. Но также следовало разработать технологию технических ВТСП-материалов с необходимыми эксплуатационными качествами и приемлемой стоимостью. Между тем создание технологии токонесущих элементов из ВТСП-материалов оказалось неизмеримо более сложной задачей, чем технологии СП-х обмоточных материалов гелиевого уровня температур. Технология керамических СП-ов все еще находится в стадии становления из-за частичной нестабильности оксидных ВТСП-материалов, их высокой хрупкости и анизотропии.

### Критическая температура, К

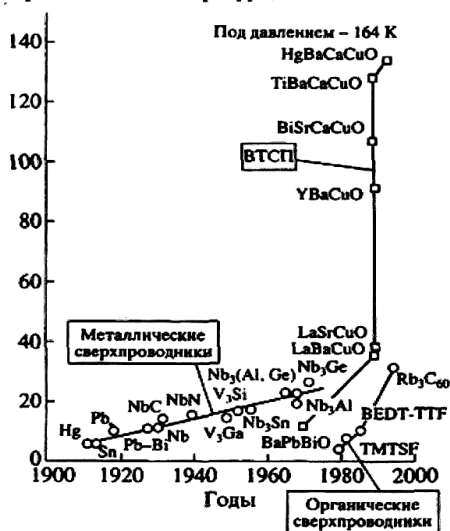


Рис. 3. Изменение критической температуры различных СП-х соединений

К середине 90-х годов были разработаны конструкции первого поколения ВТСП-проводов и начат их опытно-промышленный выпуск в США, Японии, странах Европы и России. Провода производятся главным образом методом "порошок в трубе". В процессе термомеханохимической обработки заготовки из серебряной трубки или трубки из легированного серебра, заполненной порошкообразным ВТСП-сверхпроводником, формируется лента с характерным сечением 4·0,3 мм<sup>2</sup> и длиной до 1000 м.

Сильноточные СП-е технологии ныне вышли на уровень, на котором возможно создание нового поколения электроэнергетического оборудования, существенно превосходящего оборудование традиционного (резистивного) исполнения за счет более высокой эффективности, уменьшения в 2–3 раза массогабаритных показателей и, соответственно, материалоемкости и энергозатрат на изготовление, повышения надежности и срока службы до требований электроэнергетики XXI столетия, качественных характеристик энергосистем, экологической безупречности СП-вого электрооборудования, меньшей капитальной стоимости при массовом производстве и цене СП-ка, не превышающей 10–15 долл. за 1 кА·м. Учитывая накопленные ранее знания и опыт

по созданию промышленных образцов электротехнического оборудования на основе низкотемпературной технологии, можно утверждать, что в первое десятилетие XXI в. начнется промышленное производство и освоение нового поколения СП-го электротехнического оборудования [4].

СП-е электрооборудование позволит резко увеличить электрические и магнитные нагрузки устройствах и, благодаря этому, резко сократить их размеры. В СП-щем проводе допустима плотность тока в 10...50 раз превышающая плотность тока в обычном электрооборудовании. Магнитные поля 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 ясно, что применение СП-ов уменьшит размеры и массу электрооборудования во много раз. Предварительные расчеты и исследования, первые модельные образцы показали, что не только размеры и масса, но и КПД новых машин выше, чем у самых совершенных генераторов традиционной конструкции [4, 5].

Применение СП-ти именно в турбогенераторах 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. Модельные и первые промышленные испытания показали, что в СП-щих турбогенераторах массу можно увеличить в 2–2,5 раза, в тоже время, в связи с отсутствием потерь в роторе, КПД увеличивается примерно на 0,5% и приближается для крупных турбогенераторов к 99,3%. Повышение КПД турбогенераторов 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 [4].

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;
- их использование влияет на все области деятельности, где используется электротехническое оборудование: электроэнергетика, машиностроение, металлургия, горнодобывающая и перерабатывающая промышленность, на-



земный, морской и воздушный транспорт, атомная промышленность.

Безусловно, наиболее ощутимый эффект принесет комплексное использование СП-го оборудования. Но и отдельные виды СП-го оборудования: трансформаторы, генераторы, токоограничители и индуктивные накопители, могут значительно улучшать ситуацию в существующих энергосистемах и сетях, увеличив их устойчивость, надежность и пропускную способность [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 будущих 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 "Сверхпроводимость для электроэнергетики 1996–2000 гг." Ее официальная цель сформулирована звучит: «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 традиционного (резистивного) исполнения. Включение СП-вых компонентов в коммерческое электротехническое оборудование призвано обеспечить глобальное стратегическое преимущество промышленности США в XXI в.». Также следует отметить, что по оценкам Всемирного

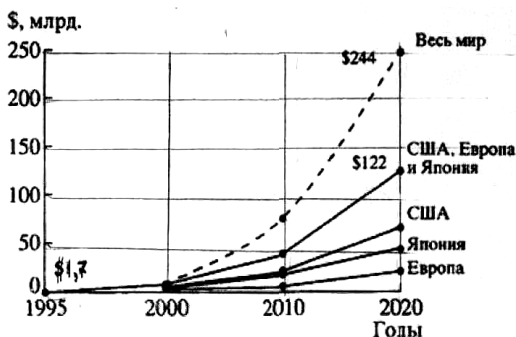


Рис. 4. Рост продаж сверхпроводящего электротехнического оборудования по прогнозу Всемирного банка

ного банка, объем продаж СП-го оборудования возрастет в мире с 2 млрд. долл. в 2000 г. до 244 млрд. долл. в 2020 г. (рис. 4) [6].

**Выводы.** 1. Ухудшение экологической обстановки на Земле и снижение запасов органического топлива заставляет рассматривать все возможные направления увеличения вырабатываемой электроэнергии. В решении этой проблемы должны рассматриваться и вопросы

снижения потерь в действующих электроустановках. В этом направлении

наиболее перспективна СП-сть.

2. Одним из основных направлений развития науки во многих промышленно развитых странах являются теоретические и экспериментальные исследования в области СП-х материалов. Продолжаются исследования по теоретическому и экспериментальному получению и поиску ВТСП-ов, по становлению теории сверхпроводимости.

3. На настоящий момент имеются два перспективных направления в области технического применения СП-сти. Это магнитные системы различного назначения и электрические машины (прежде всего, сверхпроводниковые турбогенераторы).

4. Для создания СП-х генераторов большей мощности понадобятся новые конструкторские решения и материалы. Особое внимание следует уделять развитию теории, практики сверхпроводимости, разработке технологических процессов при работе со СП-щими материалами, а также с материалами, находящимися в зоне глубокого охлаждения (в зоне криогенных температур).

5. Открытие неметаллических высокотемпературных СП-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.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Глебов И.А., Данилевич Я.Б., Мамиконянц Л.Г. *Проблемы генераторостроения // Электричество. – 1977. – № 12. – С. 12 – 19.*
2. Тинкхам М. *Введение в сверхпроводимость. – М.: Энергия, 1980. – 342 с.*
3. Кошелев П.Ф. *Механические свойства сплавов для криогенной техники. – М.: Машиностроение, 1971. – 214 с.*
4. Черноплеков Н.А. *Сверхпроводниковые технологии: современное состояние и перспективы практического применения // Вестник Российской Академии наук. – 2001. – Т. 71, № 4. – С. 303 – 319.*
5. Глебов И.А., Данилевич Я.Б., Шахтарин В.Н. *Турбогенераторы с использованием сверхпроводимости. – Л.: Наука, 1981. – 356 с.*
6. 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. 25 – 31.*

*Поступила 12.05.2005*

**Рецензент:** кандидат технических наук, профессор В.П. Соляник,  
Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков.