Автор:

Виктор Сытников,
д.т.н.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

1972

АМЕРИКАНСКИЕ ФИЗИКИ ДЖ. БАРДИН, Л. КУПЕР И ДЖ. ШРИФФЕР УДОСТОЕНЫ НОБЕЛЕВСКОЙ ПРЕМИИ ЗА ОБЪЯСНЕНИЕ ЭФФЕКТА СВЕРХПРОВОДИМОСТИ

ВВЕДЕНИЕ

Сверхпроводимость, с ее необычным свойством – нулевым электрическим сопротивлением при температуре, близкой к абсолютному нулю (~ –273 °С) была открыта в 1911 году[1] голландским ученым Каммерлинг-Оннесом. Это открытие было «побочным» эффектом соревнования за получение особо низких температур. Каммерлинг-Оннесу удалось первым получить жидкий гелий с температурой кипения 4,2 К (– 269 °С), и, измеряя сопротивление различных металлов при низких температурах, он обнаружил исчезновение сопротивления у замерзшей ртути.

Несмотря на трудности получения сверхнизких температур, довольно быстро стали появляться интересные результаты исследования этого явления. Было обнаружено, что относительно невысокие магнитные поля и небольшие токи разрушают состояние с нулевым сопротивлением[2]. Поэтому сверхпроводимость на протяжении 60 лет оставалась скорее научным курьезом и интересной физикой, а не техническим применением.

Но за 60 лет были получены важные научные результаты, которые послужили основой для появления технической сверхпроводимости. В 1933 году Мейснер и Оксенфельд[3] показали, что сверхпроводимость является новым фазовым состоянием вещества. При нулевом сопротивлении образца наблюдается выталкивание магнитного потока из внутреннего объема образца. Это открытие привело к пониманию, почему магнитные поля «вредны» для сверхпроводимости. Были сформулированы и определены для многих веществ понятия критической температуры T_c, критического магнитного поля H_c и критической плотности тока J_c. Это важные параметры, определяющие верхний предел существования сверхпроводимости в материале.

1 H. K. Onnes, "The superconductivity of mercury," Leiden Comm., vol. 120b, 122b, 124c, 1911.
2 H. K. Onnes "Magnetic researches," Leiden Comm., vol. 139b, 1914.
3 W. Meissner and R. Ochensfeld, "Ein neuer effekt bei eintritt der supraleitfahigkeit," Naturwissenschaften, vol. 21, pp. 787–790, 1933.

□□□□□□□□□□ □□□□-□□□□□ □□□ □□□□□□-□□□ □□□□□□ □□□□

В начале 50-х годов В. Гинзбургом и Л. Ландау[4] была предложена термодинамическая теория сверхпроводимости, описывающая большинство свойств сверхпроводящих материалов. За эти работы ученые были удостоены Нобелевских премий по физике: Л. Ландау в 1962 г., а В. Гинзбург в 2003 г. Теория Гинзбурга и Ландау была использована А. Абрикосовым и привела к понятию «смешанной» сверхпроводящей фазы[5], где нормальные и сверхпроводящие области могут сосуществовать (Нобелевская премия по физике 2003 г.). В смешанном состоянии магнитное поле может проникать в сверхпроводящий материал, нет полного выталкивания магнитного потока, и сверхпроводящая фаза существует в материале до очень высоких магнитных полей H_{c2}.

В смешанном состоянии по сверхпроводнику могут протекать большие токи без электрических потерь в присутствии магнитного поля. В 1961 году это было показано Кюнцлером и другими[6] для сверхпроводящего соединения Nb_3Sn. Этот год можно считать началом эры крупномасштабных, или «сильноточных», применений сверхпроводимости. Вскоре были открыты сверхпроводящие сплавы (NbZr, NbTi) и другие соединения, также со значительной токонесущей способностью в сильных магнитных полях.

ОТКРЫТИЕ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАТЕРИАЛОВ, В КОТОРЫХ ВЫСОКИЕ ТОКИ СУЩЕСТВУЮТ В ВЫСОКИХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ, СПОСОБСТВОВАЛО БОЛЬШОМУ КОЛИЧЕСТВУ НАУЧНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАЗРАБОТОК

Открытие сверхпроводящих материалов, в которых высокие токи существуют в высоких магнитных полях, способствовало большому количеству научных и технологических разработок. С этого времени начали развиваться технические применения сверхпроводимости и стало возможным создание различных сверхпроводящих устройств. Однако все они требовали охлаждения дорогим и дефицитным жидким гелием, и, как результат, все разработки остались в рамках лабораторий, кроме медицинских томографов. Огромное (и, к сожалению, пока единственное) коммерческое применение низкотемпературной сверхпроводимости получили магниты для магнито-резонансной томографии (МРТ) в медицине. Для МРТ требуется создание магнитного поля 1,5–3 Тл очень высокой однородности и в значительном объеме. Сверхпроводящие МРТ сейчас широко используются в клиниче-

4 V. L. Ginzburg and L. D. Landau, "On the theory of superconductivity,"Zh. Eksperim. I. Teor. Fiz, vol. 20, pp. 1064–1086, 1950.
5 A. A. Abrikosov, "On the magnetic properties of superconductors of the second group," JETP, vol. 5, pp. 1174–1182, 1957.
6 J. E. Kunzler, E. Buehler, F. S. Hsu, and J. H. Wernick, "Superconductivity in Nb Sn at high current density in a magnetic field," Phys. Rev.Lett., vol. 6, pp. 89–97, 1961.

ТАБЛИЦА 1. ТРЕБУЕМАЯ МОЩНОСТЬ РЕФРИЖЕРАТОРА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ 1 ВТ ХОЛОДА[7].

КРИОГЕННАЯ ТЕМПЕРАТУРА (К)	НЕОБХОДИМАЯ МОЩНОСТЬ ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ (ВТ)
200	2
150	4
100	8
77	12
30	80

ской диагностике и установлены в больших госпиталях и частных клиниках.

Возникает вопрос: почему, за почти 50 лет с момента открытия Кюнцлером «сильноточной» сверхпроводимости, все еще так мало областей, кроме чисто исследовательских, применение в которых сверхпроводимости давало бы значительные преимущества? Например, в электроэнергетике. Причина достаточно проста: необходимы значительные затраты энергии и сложные системы для поддержания рабочей температуры сверхпроводимости, обычно ниже 6 К. Основные термодинамические соотношения и неизбежная неэффективность криогенных машин требуют значительного перерасхода энергии. В таблице 1 представлены потребления мощности рефрижератором P_{ref} для обеспечения охлаждения P_{cold} до определенной криогенной температуры. Показана величина потребляемой мощности, необходимой для охлаждения до определенных температур[7].

Кроме того, сдерживающим фактором применения сверхпроводимости является техническая сложность криогенной системы, которая возрастает при понижении рабочей температуры. Вакуумные оболочки, изоляция, конструкция системы – все становится весьма сложным при криогенных температурах, и требуются особые материалы, особые конструкции систем и, немаловажно, особое инженерное мастерство.

ОТКРЫТИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ

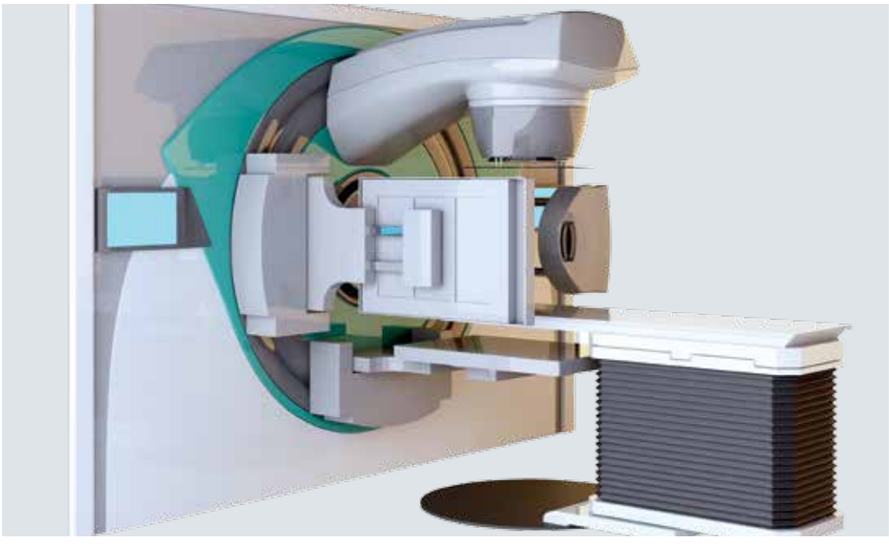
Так как применение сверхпроводимости было ограничено, в основном, необходимостью экстремально низких температур, шел постоянный поиск новых сверхпроводников с более высокой критической температурой. Но реальное движение к повышению T_c было очень медленным.

До 1986 года наиболее высокое значение T_c=23 К имело бинарное соединение Nb_3Ge, тогда как коммерческие сверхпроводящие материалы на основе сплава NbTi, используемые для магнитов, имели T_c =9,6 К[8].

В сентябре 1986 года Беднорц и Мюллер опубликовали статью[9] «Возможная высокотемпературная сверхпроводимость». В статье сообщалось о растянутом сверхпроводящем переходе с началом перехода около 40 К в керамике на основе лантана и окиси меди (купрате). Ученые всего мира стали интенсивно исследовать свойства новых материалов и открыли другие материалы с более высокими значениями T_c в том же классе соединений оксидов меди. В феврале Ву и Чу с соавторами[10] сообщили об открытии СП-материалов с T_c выше температуры жидкого азота (77 К) – прорыв, которого ждали ученые и технологи. Этот новый сверхпроводник с T_c=94 К – сложный многокомпонентный купрат системы иттрий–барий–медь–кислород (YBCO).

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТЫ

Если вы когда-нибудь подвергались электронной томографии, которая проводится на сканере с принципом ядерно-магнитного резонанса (ЯМР), то вы находились в считанных сантиметрах от сверхпроводящих электромагнитов. Именно они создают поле, позволяющее получать высокоточные образы тканей человеческого тела в разрезе без необходимости прибегать к скальпелю



□□□□□□□□□□□□ □□□□□□□□□□□, □□□-□□□□□□□□□□ □□ □□□-□□□□ □ □□□□□□□□□□ □□□□□□-□□□□□□□□□□□ □□□□□□□□□□ (□□□)

7 H. J. M. ter Brake and G. F. M. Wiegerinck, "Low power cryocooler survey," Cryogenics, vol. 42, pp. 705–718, 2002.

8 E. A. Edelsack, D. U. Gubser, and S. A.Wolf, Novel Superconductivity, S. A.Wolf and V. Z. Kresin, Eds. New York: Plenum Press, 1987, p. 1.

9 J. G. Bednorz and K. A. Mueller, "Possible high temperature superconductivity," Z. Phys., vol. B64, pp. 189–193, 1986.

10 M.Wu, J. Ashburn, C. Torng, P. Hor, R.Meng, L. Gao, Z. Huang, and C. Chu, "Superconductivity at 93 K in a new mixed–phase Yb–Ba–Cu–O compound," Phys. Rev. Lett., vol. 58, pp. 908–911, 1987.

В пределах одного года ВТСП-материалы были изготовлены в лабораториях, университетах, высших школах и даже в частных домах. Новые сверхпроводники с высокой T_c были открыты очень быстро. Наиболее высокое значение T_c имеет соединение на основе купрата ртути T_c=164 К[11], найденное в России Е. Антиповым.

Научное общество в 1987 году присудило Нобелевскую премию в области физики Беднорцу и Мюллеру за их важный вклад в открытие сверхпроводимости в керамических материалах – наиболее быстрое присуждение премии за всю ее историю. Time Magazine опубликовал статью под заголовком Wiring the Future – The Superconductivity Revolution[12]. Вопросы ВТСП-материалов обсуждались на специальных заседаниях в Конгрессе США. И тогдашний президент США созвал специальную пресс-конференцию в Вашингтоне, на которой заявил о правительственной программе, нацеленной на необходимость ставить на коммерческую основу открытие высокотемпературной сверхпроводимости.

Новые открытия докладывались тогдашнему руководству СССР и лично М.С. Горбачеву. Было принято специальное постановление правительства и выделено финансирование на исследования новых сверхпроводников, при АН СССР был создан специальный совет по ВТСП, возглавляемый академиком Ю. А. Осипяном. Ажиотаж во всем мировом научно–техническом сообществе был, конечно, необычайный!

ПОЧЕМУ ТАК МЕДЛЕННО ИДЕТ ВНЕДРЕНИЕ ВТСП

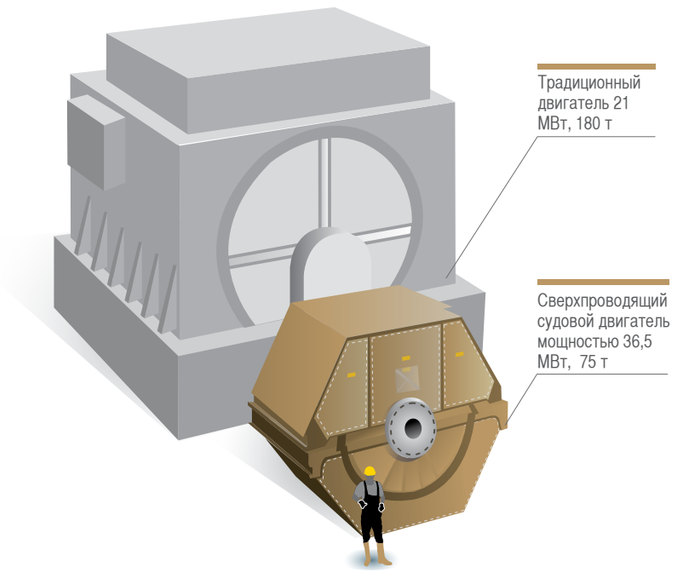
Несмотря на упомянутый ажиотаж, создание и внедрение реальных устройств на основе ВТСП было очень медленным. Происходило это потому, что ВТСП-материалы, открытые в конце 1980-х – начале 1990-х годов, очень непрактичны в применении. Сверхпроводящий материал формовался в виде зернистых таблеток, помещенных для охлаждения в жидкий азот (или жидкий воздух). Нельзя было изготовить проволоку или другую полезную форму проводника: технологические процессы, разработанные для ВТСП-таблеток, были неприемлемы для этого. Надо было разработать новые подходы, изучить новые методы синтеза и методы изготовления материалов, фактически создать новую науку материаловедения ВТСП. Прошло достаточно много времени, но технологические проблемы были все-таки решены.

В настоящее время в нескольких странах налажен промышленный выпуск высокотемпературных сверхпроводников на основе висмута (сверхпроводников «первого поколения» – 1–G). Это так называемая технология «порошок-в-трубе». В конечном счете, получается лента с запрессованными в нее сверхпроводящими волокнами соединения Bi–2223[13].

Эта технология достаточно сложна и дорога, но проблема еще и в том, что металлом, совместимым с висмутовой системой и позволяющим получить высокие токонесущие параметры, является лишь серебро – сам по себе очень дорогой материал. Это обуславливает высокую нынешнюю стоимость ВТСП первого поколения, около 120–150 долларов за кА•м, что практически на порядок превышает стоимость медного провода (~15 долларов за кА•м). Есть надежды, что при развитии массового производства и потребления таких сверхпроводников их стоимость может быть снижена до 50 долларов за кА•м. Это все еще больше стоимости медного провода, но на этом уровне уже может быть обеспечена конкурентоспособность некоторых ВТСП-устройств, особенно при повышении их мощности.

Основные надежды разработчики ВТСП-устройств в настоящее время связывают с разработкой высокотемпературных сверхпроводников 2-го поколения. Это так называемые coated tapes – пленки с покрытием. В этом случае на гибкой подложке из нержавеющей стали, никелевого сплава или другого подобного металла формируется специальный буферный слой с кристаллической структурой, подобной структуре сверхпроводника типа YBaCuO. В дальнейшем на этот слой осаждается сверхпроводник (YBaCuO или подобный ему), который затем покрывается стабилизирующим металлом. Получается гибкая тонкая, с хорошо ориентированной кристаллической структурой сверхпроводящая пленка.

СРАВНЕНИЕ РАЗМЕРОВ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО И ТРАДИЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЕЙ



11 L. Gao, Y. Y. Xue, F. Chen, Q. Xiong, R. L. Meng, D. Ramirez, C. W. Chu, J. H. Eggert, and H. K. Mao, "Superconductivity up to 164 K in HgBa Cu O under quasihydrostatic pressure," Phys. Rev. B, vol. 50, pp. 4260–4263, 1994.

12 Time Mag., vol. 129, no. 19, May 11, 1988.

13 J. Kellers, L.J. Masur, Reliable commercial HTS wire for power applications, Physica C, v. 372–376, 2002, p.p.1040–1045

Токонесущая способность такой пленки весьма высока (достигая 3 МА/см^2 в сверхпроводнике при температуре жидкого азота), высока и эффективная, инженерная плотность тока (отнесенная ко всему сечению провода).

Увеличение плотности тока и использование сравнительно недорогих исходных материалов в сверхпроводниках 2-го поколения позволяет производителям надеяться (при массовом производстве) на стоимость провода порядка 20–15 долларов за кА•м, что уже сравнимо со стоимостью меди. В настоящее время интенсивные работы по разработке и созданию промышленного производства ВТСП 2-го поколения ведутся во многих промышленно развитых странах. Две американские компании с 2006 года начали коммерческие продажи сверхпроводников 2-го поколения, правда, пока еще по цене, существенно выше цены проводов 1-го поколения.

ВОЗМОЖНОЕ ВЛИЯНИЕ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ НА СОВРЕМЕННУЮ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКУ

В 2002 году США потребили 3,8 трлн киловатт-часов электроэнергии. К 2015 году 50% всего потребления энергии будет составлять электрическая энергия. Электричество для приведения в действие машин и обогрева составляет приблизительно 70% всего промышленного использования электроэнергии. Осветительные и электронные устройства (телевизоры, компьютеры и др.) – это растущий сегмент использования электричества, который требует особо высокого уровня качества электроэнергии (стабильности напряжения, тока и частоты на продолжительном отрезке времени). Кроме того, транспортные системы все более и более основываются на электроэнергии – корабли, самолеты, наземные транспортные средства и др.

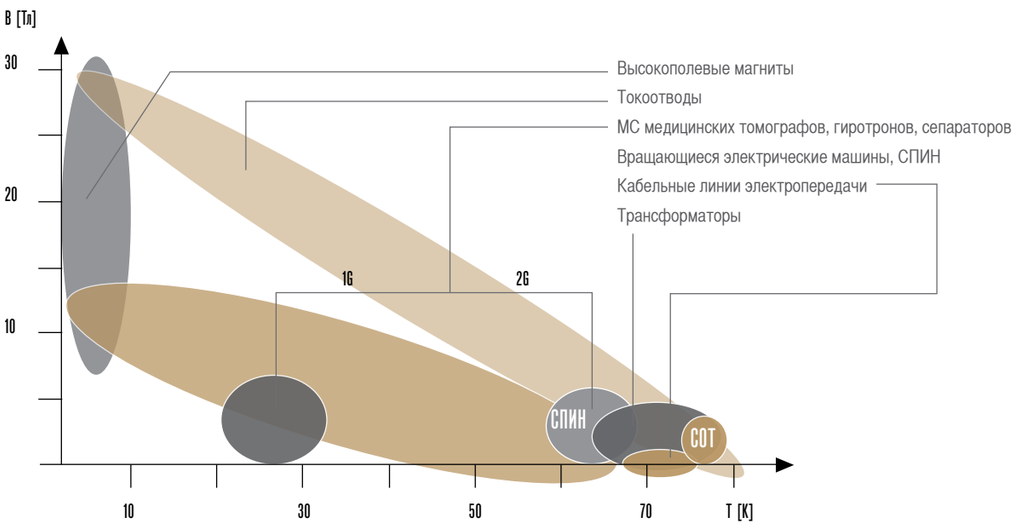
Таким образом, потребность в эффективной генерации, передаче, распределении, управлении и использовании электрической энергии – это постоянно растущая необходимость.

Электрическая энергосистема начинается с генератора, который превращает механическую энергию в электрическую. После генератора обычно устанавливается повышающий трансформатор напряжения, чтобы увеличить эффективность воздушных передач электроэнергии на большие расстояния. В системе передачи установлены устройства – накопители энергии, компенсаторы реактивной мощности, коммутирующая аппаратура и другие элементы энергосети. Когда линии передачи энергии подходят к потребителю, используются понижающие трансформаторы, чтобы обеспечить требуемый уровень тока-напряжения. В городах и зданиях электроэнергия часто передается кабелем.

ОДНО ИЗ ПРЕИМУЩЕСТВ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ – БОЛЕЕ КОМПАКТНЫЕ И ЛЕГКИЕ КОМПОНЕНТЫ СИСТЕМЫ ПРИ ТОЙ ЖЕ МОЩНОСТИ

Сверхпроводимость может привнести массу преимуществ в обычную энергосистему. Прежде всего, поскольку сверхпроводимость создает нулевое (для постоянного тока) или близкое к нулю (для переменного тока) сопротивление электрическому току, использование сверхпроводящих материалов может значительно повысить эффективность всей энергосистемы, при этом значительно снизить размер и вес активных составляющих и оборудования. Это означает более компактные и легкие компоненты системы при той же мощности или возросшую мощность для устройств того же размера или веса.

ВОЗМОЖНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ВТСП



[illegible]

Наконец, из-за низкого импеданса сверхпроводящих устройств полная стабильность энергосистемы может быть значительно повышена.

СОСТОЯНИЕ РАБОТ ПО СВЕРХПРОВОДЯЩИМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ УСТРОЙСТВАМ

Основные требования к разработкам сверхпроводящих систем для электроэнергетики можно сформулировать следующим образом. Современная энергосистема является важнейшей социальной инфраструктурой, обеспечивающей главные потребности жизни человека. Обычные (несверхпроводящие) энергосистемы прошли долгий путь развития и удовлетворительно работают, хотя и имеют целый ряд недостатков. Поэтому главные требования к сверхпроводящим системам – высокая надежность и высокая эффективность, лучшая, чем у обычных систем. При этом абсолютно необходим экономический подход ко всем разработкам – новые системы не должны быть слишком дорогими. Весьма важно качество поставляемой электроэнергии. Основные направления развития сверхпроводимости для электроэнергетики показаны на рис. 1.

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ СИЛОВЫЕ КАБЕЛИ

Основными преимуществами сверхпроводящих силовых кабелей являются следующие:

- [illegible];
- [illegible];
- [illegible] – [illegible];
- [illegible];
- [illegible];
- [illegible].

По конкретным проектам можно отметить следующее. Два первых ВТСП-силовых кабеля с длинами по 30 м несколько лет испытываются в реальных энергосистемах – проект Southwire с 2000 г., проект NKT с 2001 г. Кабели работают успешно уже более нескольких десятков тысяч часов, идет наработка опыта работы.

В настоящее время среди крупных завершенных проектов следует отметить:

- [illegible] – [illegible] *500* [illegible] *200* [illegible]
- [illegible] – [illegible] – *660* [illegible], *350* [illegible], *200* [illegible]
- [illegible] – [illegible] *30* [illegible], *100* [illegible], *410* [illegible]
- [illegible] – [illegible] *30* [illegible], *75* [illegible]

В 2005 году начат проект по созданию полномасштабного макета сверхпроводящего силового кабеля в России, финансируемый структурами РАО ЕЭС России. Созданы трехфазные кабельные системы длиной 30 и 200 м.

ВТСП КЛ постоянного и переменного тока являются инновационным решением, позволяющим решить значительную часть проблем электрических сетей

ЗА ОБЪЯСНЕНИЕ ЭФФЕКТА СВЕРХПРОВОДИМОСТИ БАРДИН, КУПЕР И ШРИФФЕР В 1972 Г. ПОЛУЧИЛИ НОБЕЛЕВСКУЮ ПРЕМИЮ. СЕГОДНЯ СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ – ОБЩЕПРИЗНАННЫЙ ФАКТ И ИСТОЧНИК МНОГОМИЛЛИАРДНЫХ ДОХОДОВ ЭЛЕКТРОННОЙ ИНДУСТРИИ, И РАЗРАБОТКИ В ЭТОМ НАПРАВЛЕНИИ ПРОДОЛЖАЮТСЯ

мегаполисов. А при использовании ВТСП КЛ постоянного тока приобретается новое качество передачи, которая становится управляемым элементом сети, регулирующим потокораспределение, а также элементом, обладающим функцией токоограничения, что позволяет осуществить взаимное резервирование энергорайонов мегаполисов. По оценкам ОАО «НИИПТ» и ОАО «ЭСП» передачи постоянного тока (ППТ) на среднем напряжении способны решить многие сетевые проблемы мегаполисов при уровне передаваемой мощности 50–250 МВт. Современный уровень развития техники и достигнутый уровень свойств сверхпроводящих материалов позволяют передавать такие мощности при 20 кВ в одноцепном исполнении и при 10 кВ по двухцепным линиям.

ВТСП-кабельные линии постоянного тока по сравнению с кабелями переменного тока обеспечивают дополнительные преимущества, что позволяет:

- [illegible];
- [illegible];
- [illegible];
- [illegible].

Принимая во внимание очевидные преимущества ВТСП КЛ постоянного тока, во многих странах (США, Ю. Корея, Китай, Япония) начались работы по созданию таких линий для различных целей.

В России по инициативе ОАО «ФСК ЕЭС» в конце 2010 года начаты работы, целью которых является создание ВТСП-кабельной линии постоянного тока на напряжение 20 кВ с током 2500 А с системой криогенного обеспечения, включая преобразователи, концевые и соединительные муфты. Пилотный проект подобной кабельной линии предполагается осуществить в одном из районов г. Санкт–Петербурга, где остро стоит проблема повышения надежности электроснабжения в совокупности с решением проблемы ограничения токов к. з.

ОГРАНИЧИТЕЛИ ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Ограничитель тока короткого замыкания (СОТ) – это устройство, позволяющее быстро и эффективно ограничить аварийные токи в сети при коротком замыкании, при ударе молнии в линию электропередачи и пр. В принципе любая линия снабжается выключателем, но они в большинстве своем срабатывают недостаточно быстро, чтобы отключить поврежденный участок и защитить оборудование. Все традиционные выключатели пропускают «ударный» ток. Сверхпроводящий ограничитель тока уменьшает «ударный» ток и ток короткого замыкания до приемлемых величин, при которых линию могут эффективно отключить защитные устройства.

При превышении током в цепи критического значения в сверхпроводнике автоматически появляется сопротивление, ограничивающее ток. Существуют и другие схемы сверхпроводящих СОТ, использующие не только переход между нормальным и сверхпроводящим состоянием, но и свойство сверхпроводимости сохранять захваченный магнитный поток. В этом случае при замыкании и повышении тока меняется полный импеданс в цепи, также ограничивая ток короткого замыкания. Различные методы токоограничения подробно рассмотрены в работе[14].

Следует отметить, что сверхпроводящие ограничители тока – это наиболее активно обсуждаемая тема в области применений сверхпроводимости в электроэнергетике, им посвящено огромное количество работ. В основном это пока исследовательские работы по оптимизации и выбору схемы ограничителя и схемы его работы в сетях; подбор оптимальных сверхпроводящих материалов, разработка новых элементов ограничителя. Но тем не менее в настоящее время реализовано несколько реальных проектов с мощностью до 10 МВА. Несколько вариантов с мощностями порядка МВА установлены на подстанциях.

По исследованиям и разработкам сверхпроводящих ограничителей тока короткого замыкания для энергосетей можно делать следующие выводы:

- [illegible];
- [illegible];
- [illegible];
- [illegible].

ТРАНСФОРМАТОРЫ

Современные тенденции по НИКОР в области сверхпроводящих трансформаторов можно охарактеризовать следующим образом. После запуска первых проектов ВТСП-трансформаторов на уровень мощности ~1 МВА в Японии (1996 г.) и в Европе (ABB+AMSC – 1997 г.) новых реальных проектов немного. Ведутся разработки трансформаторов уровня 10 МВА и выше. Ведутся исследовательские работы по изучению потерь и возможной комбинации ВТСП-лент для снижения потерь и их транспозиции. Исследуется возможность использования ВТСП 2-го поколения – модель трансформатора 41 кВА (Европа).

Нынешний уровень цен на исходные сверхпроводники сильнейшим образом сдерживает внедрение ВТСП-трансформаторов. В последние годы возродился интерес к ВТСП-трансформаторам в связи с разработкой новых схем совмещения в одном устройстве функций и трансформатора, и токоограничителя.

НАКОПИТЕЛИ ЭНЕРГИИ

Качество поставляемой электроэнергии становится все более важным для промышленности. Кратковременные отключения и мгновенные падения напряжения неизбежны, но абсолютно недопустимы с точки зрения специального потребителя. Поэтому необходимы резервные источники энергии для малых времен, которыми могут служить сверхпроводящие индуктивные накопители энергии (СПИН). Накопители энергии для управления энергосистемами, стабилизации напряжения в узлах энергосистемы и повышения ее устойчивости также весьма важны.

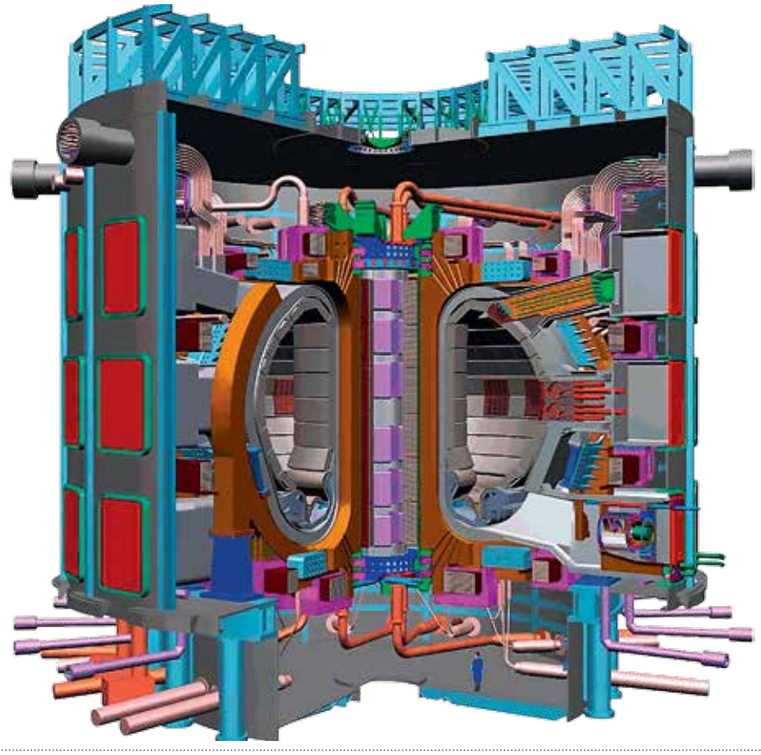
Преимущества сверхпроводящих индуктивных накопителей энергии следующие:

- [illegible];
- [illegible];
- [illegible];

ИТЭР

ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor, ИТЭР) – проект международного экспериментального термоядерного реактора Основная работа на этом этапе выполняется под руководством международного агентства ITER. Задача ИТЭР заключается в демонстрации возможности коммерческого использования термоядерного реактора и решении физических и технологических проблем, которые могут встретиться на этом пути. В настоящее время проектирование реактора полностью закончено и выбрано место для его строительства – исследовательский центр Кадараш на юге Франции, в 60 км от Марселя.

В целом сооружения ITER будут представлять собой 60-метровый колосс весом 23 тыс. тонн. Реактор ITER будет использовать 900 тонн сверхпроводников и более чем 20 индивидуальных сверхпроводимых магнитов.



3D-[illegible]

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ ОГРАНИЧИТЕЛИ ТОКА – ЭТО НАИБОЛЕЕ АКТИВНО ОБСУЖДАЕМАЯ ТЕМА В ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЙ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ, ИМ ПОСВЯЩЕНО ОГРОМНОЕ КОЛИЧЕСТВО РАБОТ. В ОСНОВНОМ ЭТО ПОКА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ РАБОТЫ ПО ОПТИМИЗАЦИИ И ВЫБОРУ СХЕМЫ ОГРАНИЧИТЕЛЯ И СХЕМЫ ЕГО РАБОТЫ В СЕТЯХ; ПОДБОР ОПТИМАЛЬНЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАТЕРИАЛОВ, РАЗРАБОТКА НОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ОГРАНИЧИТЕЛЯ

14 Mathias Noe1 and Michael Steurer, High–temperature superconductor fault current limiters: concepts, applications, and development status, Supercond. Sci. Technol. 20 (2007) R15–R29

- [illegible];
- [illegible].

Поскольку в индуктивных накопителях энергия запасается в магнитном поле, то требуется значительная величина поля. Это сложно обеспечить с помощью современных ВТСП-проводов, поэтому пока в проектах сверхпроводящих индуктивных накопителей используются низкотемпературные сверхпроводники, в основном работающие при температуре жидкого гелия 4,2 К, или ВТСП-материалы, охлажденные до температур ниже азотных.

Современные тенденции по СПИН могут быть сформулированы следующим образом:

- [illegible];
- [illegible] – [illegible];
- [illegible] *IGC* [illegible] *AMSC* [illegible];
- [illegible];
- [illegible];
- [illegible]–[illegible]–[illegible].

По оценкам японских исследователей, приемлемая стоимость СПИН должна быть в пределах 700 долларов за кВт мощности для стабилизации электросетей (запасенная энергия не менее 15 кВт-час) и порядка 2000–3000 долларов за кВт при стабилизации частоты и компенсации флуктуаций напряжения (запасенная энергия не менее 5000 кВт-час).

ПИЛОТНЫЙ ПРОЕКТ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ ПОСТОЯННОГО ТОКА С СИСТЕМОЙ КРИОГЕННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРЕДПОЛАГАЕТСЯ ОСУЩЕСТВИТЬ В ОДНОМ ИЗ РАЙОНОВ Г. САНКТ-ПЕТЕРБУРГА, ГДЕ ОСТРО СТОИТ ПРОБЛЕМА ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

ВРАЩАЮЩИЕСЯ МАШИНЫ

Преимущества сверхпроводящих вращающихся машин следующие:

- [illegible];
- [illegible];
- [illegible];
- [illegible];
- [illegible].

В настоящее время построено несколько реальных прототипов ВТСП – вращающихся машин и просматриваются возможности коммерциализации проектов. Уже созданы машины мощностью от долей до десятков МВА для различных приводов, в первую очередь судовых.

На странице 41 показан сверхпроводящий судовой двигатель мощностью 36,5 МВт и его сравнение с традиционным двигателем. Для энергетических применений создан синхронный компенсатор на 8 Мвар и ряд генераторов.

Особый интерес в последнее время вызывают разработки ВТСП-генераторов для ветряных электростанций. Во всех проектах используются ВТСП-материалы при температурах порядка 30 К.

По сверхпроводящим машинам можно сделать следующий вывод:

- [illegible];
- [illegible];
- [illegible];
- [illegible]–[illegible].

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ ВТСП-УСТРОЙСТВ

Несмотря на название «высокотемпературная», современная сверхпроводимость существует при достаточно низких, криогенных температурах. Создание достаточно низкой температуры для работы ВТСП-устройств остается важной и трудной инженерной задачей. Разработка надежных и эффективных охлаждающих устройств обязательна при внедрении сверхпроводимости в электроэнергетику. Последние достижения в создании криокулеров (микроохладителей) революционизировали подход к разработке криогенных систем для сверхпроводящих устройств. Имеется возможность охлаждения до уровней 4–80 К достаточно крупных систем абсолютно без использования жидких гелия или азота. Возможность «сухого» охлаждения до уровней 20–30 К значительно повышает эффективность ВТСП-устройств.

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА ИМЕЮТ ЗАМЕТНЫЕ ПРЕИМУЩЕСТВА ПО СРАВНЕНИЮ С ОБЫЧНЫМИ. ВАЖНО ВЫДЕЛИТЬ ПРАВИЛЬНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ НИОКР, ДЕМОНСТРАЦИИ И КОММЕРЦИАЛИЗАЦИИ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ. РАЗРАБОТКИ И УЛУЧШЕНИЕ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И СНИЖЕНИЕ ИХ ЦЕНЫ ЯВЛЯЮТСЯ ВАЖНЫМ ПУТЕМ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

ПЕРСПЕКТИВЫ И ВЫВОДЫ

Сверхпроводящие электроэнергетические устройства имеют заметные преимущества по сравнению с обычными. Важно выделить правильные направления для НИОКР, демонстрации и коммерциализации сверхпроводящих электроэнергетических устройств. Разработки и улучшения новых материалов и снижение их цены являются важным путем повышения эффективности и экономической целесообразности применения сверхпроводимости в электроэнергетике. В настоящее время степени продвижения разработок сверхпроводящих устройств в электроэнергетику можно охарактеризовать следующим образом:

- [illegible] – [illegible].
- [illegible] – [illegible].
- [illegible] – [illegible].
- [illegible] – [illegible].
- [illegible] – [illegible].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

НАСТОЯЩЕЕ

В настоящее время происходит существенное совершенствование ВТСП-материалов, которые поднимают рабочую температуру и критическую плотность тока.

Продолжаются поиски новых сверхпроводящих материалов во многих областях, включая такие экзотические, как органические соединения, комбинации разнородных материалов и пр.

Запущенные демонстрационные проекты электроэнергетических устройств помогут дать реальную оценку преимуществ ВТСП-технологий (технических, экономических и в области окружающей среды) по сравнению с обычными технологиями. Следующие несколько лет будут критическими в данной отрасли. Конструкторы, инженеры и энергетические компании научатся преодолевать сложности разработки криогенных систем и работы с криогенными системами. Оптимальные пути внедрения технологии станут более понятными в ближайшее время.

БУДУЩЕЕ

Предполагается, что будущий рынок ВТСП-технологий будет огромен. Требуемые мощности и потребление энергии растут тогда, как источников энергии становится недостаточно, чтобы удовлетворить растущие общественные нужды. Загрязнение окружающей среды также растет. В будущем эффективное распределение и использование электроэнергии станет первостепенной проблемой. Сверхпроводимость, с ее замечательным свойством нулевого сопротивления, по-видимому, единственное физическое явление, способное кардинально решить эту проблему. ■

[illegible]