УДК 621.313.322-81

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

В.Ф. Болюх, В.Г. Данько, Л.И. Лысенко
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,
Украина, 61002, г. Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ «ХПИ», кафедра «Общей электротехники»
Тел. (0572) 40-04-27, E-mail: bolukh@kpi.kharkov.ua

У статті аналізується стан і основні тенденції розвитку електромеханічних перетворювачів зі надпровідниковими обмотками. Представлені результати, досягнуті в надпровідникових матеріалах, проводах, а також електричних машинах, трансформаторах та інших пристроях з використанням надпровідності

В статье анализируется состояние и основные тенденции развития электромеханических преобразователей со сверхпроводящими обмотками. Представлены результаты, достигнутые в сверхпроводящих материалах, проводах, а также электрических машинах, трансформаторах и других устройств с использованием сверхпроводимости.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных направлений развития электромеханики в XXI веке является разработка новых или усовершенствование традиционных устройств, использующих электротехнические материалы с уникальными свойствами. В этом плане сверхпроводники рассматриваются как одни из наиболее перспективных и эффективных материалов, способных обеспечить новый импульс в электромашиностроении [1]. За счет многократного или полного уменьшения электросопротивления возможно радикально понизить потери и повысить КПД электромеханического устройства. Иным замечательным свойством проводов из сверхпроводящих материалов является высокая плотность тока, достигающая нескольких кА/мм^2, за счет чего можно возбуждать сильные магнитные поля в активной зоне, устранить ферромагнетик из магнитной цепи, уменьшить массогабаритные показатели и повысить удельные электромагнитные параметры устройства. За счет использования эффекта полного или частичного диамагнетизма при помощи сверхпроводниковых экранов можно формировать необходимое магнитное поле в активной зоне и уменьшать поля рассеяния.

Криостатирование устройства позволяет практически устранить градиенты температур и термомеханические напряжения, уменьшить процесс старения высоковольтной изоляции. При этом необходимо учитывать, что диэлектрическая прочность многих криогенных жидкостей высока, а у жидкого азота она не уступает диэлектрической прочности трансформаторного масла.

О перспективности данного направления развития науки и техники свидетельствует огромный интерес ученых, специалистов и бизнес-структур во многих странах мира. Так, в 1999 г. в США была проведена 16 международная конференция по магнитным технологиям с использованием сверхпроводников. На ней было представлено 510 участников из 90 различных компаний, 91 университетов и 70 государственных институтов. Еще более впечатляет проведенная там же в сентябре 2000 г. конференция по прикладной сверхпроводимости, где было представлено уже 1650 участников, а общий объем научных трудов составил 4000 стр.

В ряде стран выполняются масштабные программы по созданию промышленного сверхпроводникового оборудования. В частности, в США под эгидой министерства энергетики разработана долгосрочная программа, согласно которой финансируются работы по четырем основным направлениям: сверхпроводниковые ограничители тока КЗ, сверхпроводниковые генераторы для электростанций, сверхпроводниковые промышленные двигатели и сверхпроводниковые кабели.

По оценкам Всемирного банка объем продаж сверхпроводникового оборудования в мире возрастет с 1,7 в 2000 г. до 244 млрд. долларов в 2020 г. (рис. 1).

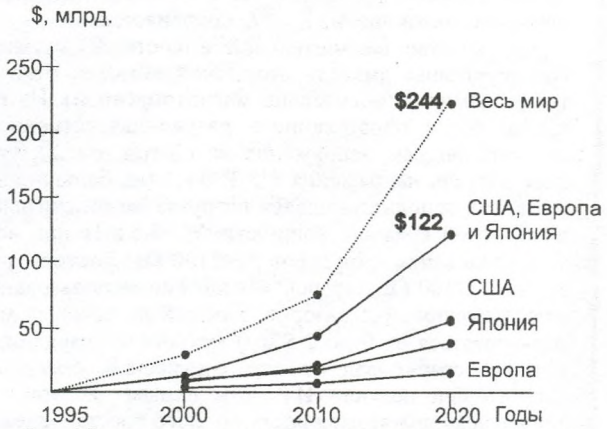

Рис. 1 Рынок сверхпроводникового электротехнического оборудования [2]

ПРОБЛЕМЫ ПРИКЛАДНОЙ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ

Широкому практическому использованию явления сверхпроводимости в электромеханике препятствуют следующие факторы.

- Сверхпроводники сохраняют свои замечательные свойства только при криогенных температурах.
- Существуют критические плотности тока и магнитного поля, при превышении которых происхо-

дит переход в нормальное состояние с появление высокого сопротивления.

Сверхпроводящие провода дорогостоящие. Они остоят из особых материалов и представляют со-ой сложную конструкцию.

Необходимо применение специальных криогенных ожижителей и хладагентов, криостатов и друого вспомогательного оборудования для функционирования сверхпроводниковых элементов устройства.

Происходит постоянное развитие и совершенствование электромеханических устройств, использующих нормально проводящие проводники, что является альтернативой сверхпроводниковой технологии.

- Существуют значительные технологические, технические и финансовые проблемы, связанные с использованием сверхпроводников.

Однако со временем многие из этих проблем успешно решаются. Так, в настоящее время разработаны компактные, с большим ресурсом безостановочной работы микроохладители широкого спектра температур, начиная с гелиевых, на основе циклов Гиффорда-Мак-Магона и Стирлинга. Их надежность приближается к надежности бытовых холодильников.

Использование жидкого азота вместо гелия во многом решает проблему коммерческой привлекательности сверхпроводниковых устройств. Так, один ватт тепла, выделяемый при температуре 4,2 К, требует около 1 кВт мощности ожижителя при комнатной температуре, в то время, как один ватт тепла, выделяемый при температуре 77 К, требует 10 Вт и меньше мощности ожижителя. При этом необходимо учитывать, что стоимость литра жидкого гелия составляет примерно $5, а жидкого азота $0,022. При этом значительно упрощаются системы теплоизоляции, криостатирования, компенсации термонапряжений, передачи электродинамических усилий из холодной в теплую зону, защиты сверхпроводникового узла при нестабилизированном переходе в нормальное состояние. Это все приводит к снижению стоимости и повышению надежности электромеханического устройства.

Рассмотрим основные направления развития электромагнитных устройств и электромеханических преобразователей со сверхпроводниковыми обмотками.

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ МАТЕРИАЛЫ

Все сверхпроводники условно можно разделить на низкотемпературные (НТСП) и высокотемпературные (ВТСП). К первой группе относятся чистые металлы (например, Hg, Pb, Va), сплавы (Nb-Ti, Nb-Al) и интерметаллические соединения (Nb_3Sn, Nb_3Ge), устойчиво работающие лишь при температуре жидкого гелия 4,2 К. Ко второй группе относятся различные керамические соединения, способные работать при температуре жидкого водорода (LaBaCuO, LaSrCuO) или азота (YBaCuO, BiCaSrCuO, TlCaBaCuO, HgCaBaCuO) (рис. 2).

В настоящее время промышленно выпускаются комбинированные многожильные провода гелиевого уровня, в которых непосредственно сами сверхпроводники выполняются в виде сверхтонких жил, размещенных в медной или алюминиевой матрице. Основу гелиевых проводов составляют:

- Nb-Ti со следующими критическими параметрами: температура $T_к$=9,6 К при индукции магнитного поля B=0, $B_к$=12 Тл при T=4,2 К и плотность тока $j_к$=3 кА/мм^2 при T=4,2 К и B=5 Тл. Стоимость провода не превышает нескольких долларов за 1 кА·м.

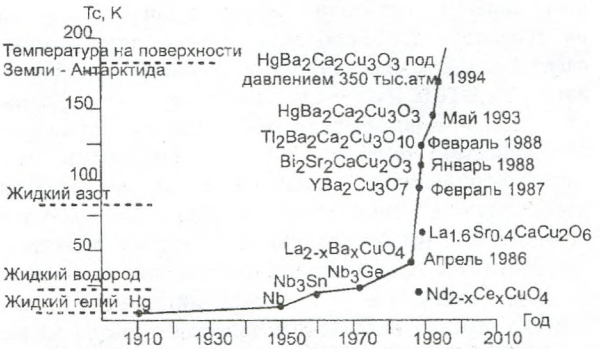

Рис. 2 История открытия НТСП и ВТСП материалов

- Nb_3Sn с $T_к$=18,3 К при B=0, $B_к$=22 Тл при T=4,2 К и B=0, $j_к$=9 кА/мм2 при T=4,2 К и B=10 Тл. Стоимость этого провода составляет примерно 10 долларов за 1 кА·м.

ВТСП провода производят, в основном, методом «порошок в трубе». В процессе термомеханохимической обработки заготовки из серебряной трубки, заполненной порошком ВТСП материала, формируется лента с характерным сечением 4×0,3 мм^2 и длиной до 1 км. Ленточные ВТСП-провода изготавливаются на основе следующих материалов.

- Соединение $Bi_2Sr_2CaCu_2O_x$ в серебряной оболочке (Bi2213/Ag). Его критическая температура $T_к$≈90 К, критическое поле и токи превышают аналогичные показатели НТСП проводов.
- Соединение Bi2223/Ag имеет $T_к$=107 К, $j_к$=100 А/мм^2 при T=77,3 К и B=1 Тл. Стоимость этого материала составляет около 100 долларов за 1 кА·м. В ближайшее время ожидается снижение его цены до 10÷15 долларов за 1 кА·м, что сделает его конкурентноспособным на рынке сверхпроводящих материалов.
- Начат выпуск массивных материалов на основе соединения $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ и $NdBa_2Cu_3O_{7-x}$, которые в режиме замороженного поля конкурируют с лучшими постоянными магнитами.

Хотя работа при азотной температуре имеет очевидные преимущества, существуют и факторы, сдерживающие широкое применение ВТСП материалов. Эти материалы:

- очень хрупкие и сложно обрабатываются;
- размещаются внутри дорогой серебряной матрицы;
- синтезируются при высокой температуре в присутствии кислорода;
- имеют слоистую структуру подобную слюде, поэтому характеристики провода очень чувствительны к ориентации проводника.

Провода из YBaCuO, которые способны нести намного более высокий ток, сейчас изготавливаются в малых количествах. Хотя существует два различных процесса осаждения этого материала на поверхность металлической ленты шириной 10 мм, приводящих к высокой плотности тока проводника, было изготовлено только несколько лент длиной около 1 м [3].

Нужно сказать, что выбор материала сверхпроводника лишь в определенной степени влияет на конструкцию устройства, что делает задачу его совершенствования достаточно универсальной. Несмотря на существующие проблемы, многие разработчики сверхпроводниковых устройств начинают ориентироваться на ВТСП материалы, поскольку в этом случае их технико-экономические преимущества становятся неоспоримыми по сравнению с традиционными "теплыми" устройствами. Однако и НТСП, несмотря на необходимость охлаждения относительно дорогостоящим жидким гелием, также не теряют привлекательности для практического применения, в первую очередь потому, что на сегодняшний день их производство хорошо налажено и является гораздо менее дорогостоящим. На рис. 3 показан график предполагаемых перспектив и стадии практического применения как НТСП, так и ВТСП [3].

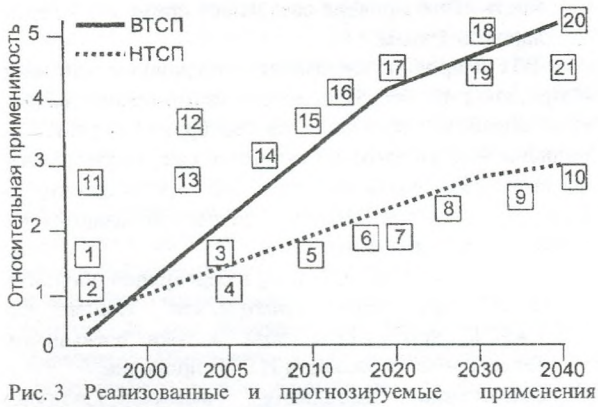

Рис. 3 Реализованные и прогнозируемые применения НТСП и ВТСП: 1-контроль технологических процессов, микронакопители энергии; 2-приборы на основе сквидов, магниты для ускорителей, магнитные томографы; 3- обработка аналоговых сигналов; 4- обработка цифровых сигналов, ограничители тока КЗ; 5-транспорт на магнитной подушке, электрические двигатели для кораблей; 6-крупные накопители энергии; 7-генераторы (МВА), электродвигатели (МВт); 8-электромагнитные двигатели для кораблей; 9-трансформаторы (1ГВА);10-термоядерные реакторы; 11-магнитные экраны; 12-СВЧ-приборы, провода; 13-магнитные подшипники; 14- обработка аналоговых сигналов, провода, силовые кабели; двигатели; 15-ограничители тока КЗ, регуляторы технологических процессов, накопители энергии; 16-микронакопители энергии, обработка цифровых сигналов, кабели (2 ГВА); 17-транспорт на магнитной подушке, двигатели (МВт); 18-генераторы (МВА); 19-электромагнитные двигатели для кораблей; 20-термоядерные реакторы, накопители энергии (100 кВт·час); 21-трансформаторы (ГВА), кабели (5ГВА).

НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ УСТРОЙСТВ

Структура существующих и потенциальных возможностей применения сверхпроводниковых технологий представлена на рис.4. На рисунке сверху представлены области науки, которые обусловливают развитие прикладной сверхпроводимости и которые имеют наибольший практический выход. Далее приведены области техники, где либо уже имеется конечный продукт в виде готового устройства, либо проводятся концептуальные разработки устройств с применением сверхпроводниковых узлов. В электромеханике такими устройствами являются [4]:

- коллекторные криодвигатели постоянного тока со статорной сверхпроводниковой многополюсной системой возбуждения и теплым гладким ротором;
- униполярные двигатели/генераторы дискового и цилиндричного типа с неподвижными сверхпроводниковыми обмотками возбуждения и жидкометаллическим токосъемом;
- турбогенераторы со сверхпроводниковым немагнитным ротором и безпазовым теплым статором;
- полностью сверхпроводниковые турбогенераторы без магнитопровода с обмотками возбуждения, якоря и внешним электромагнитным экраном;
- сверхпроводниковые синхронные двигатели с вращающимся явнополюсным ВТСП-ротором;
- сверхпроводниковые гистерезисные и реактивные двигатели с ВТСП-ротором;
- линейные синхронные двигатели для высокоскоростного наземного транспорта на электродинамическом подвесе с расположенными на движущемся экипаже сверхпроводниковыми обмотками возбуждения;
- линейные электродинамические двигатели возвратно-поступательного движения с постоянными магнитами и сверхпроводниковой обмоткой управления;
- двигатели, действующие на основе эффекта Мейснера;
- линейные цилиндрические асинхронные двигатели с первичной сверхпроводниковой обмоткой статора и якорем, выполненным в виде внутреннего алюминиевого цилиндра, перемещающегося при комнатной температуре;
- трансформаторы и др.

Исследования по применению сверхпроводимости в промышленных электродвигателях ведутся с 1970-х годов. Сейчас в мире есть несколько программ по разработке сверхпроводниковых электродвигателей и в последующие два года ожидается ряд демонстрационных испытаний. В России уже разработаны и прошли испытания гистерезисные ВТСП электродвигатели малой (100 Вт) и средней (до 4 кВт) мощности, а также реактивные ВТСП двигатели средней мощности (до 10 кВт) [5]. В США группа, возглавляемая компанией Rockwell International/Reliance Electric, разрабатывает электродвигатель на 1000 л.с. Первый двигатель, параметры которого представлены в табл. 1, сейчас проходит ряд испытаний. Также ведутся проектные разработки реактивного ВТСП двигателя мощностью до 125 кВт [6].

Таблица 1. Параметры конструкции ВТСП электродвигателя мощностью 1000 л.с.

Параметр	Величина
Частота вращения	1800 об/мин
Номинальное напряжение	4160 В
Номинальный ток якоря	104 А
Ток возбуждения обмотки возбуждения	120 А
Проектный КПД электродвигателя	97,1%
Внешний диаметр ротора	0,4 м
Внешний диаметр якоря	0,686 м
Длина якоря	1,22 м
Рабочая температура обмотки возбуждения	33 К
Максимальная индукция	1,5 Т

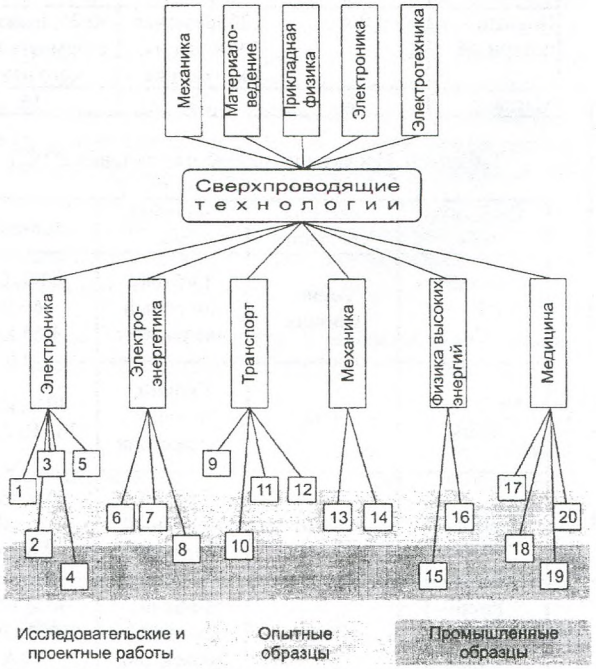

Рис. 4 Состояние и области применения верхпроводимости: 1-токовводы; 2-сверхпроводниковые электронные приборы; 3-вычислительная техника на сверхпроводниковых элементах; 4-сквиды; 5-сотовая и спутниковая связь; 6-генераторы; 7-накопители электрической мощности; 8- силовые кабели; 9- космические станции; 10-транспорт на магнитной подушке; 11-подъемные устройства; 12- электродвигатели для кораблей; 13-двигатели; 14- магнитные подшипники; 15-ускорители; 16-синхротроны; 17- магнитоэнцефалографы; 18-магнитные экраны; 19-ЯМР-томографы; 20-магнитокардиографы.

Сверхпроводниковые генераторы переменного тока имеют огромный потенциал для широкомасштабного промышленного применения. Они способны за счет большего магнитного поля, генерируемого сверхпроводящей обмоткой, более эффективно осуществлять преобразование энергии, обеспечивая повышение КПД на величину от 0,5% до 1,0%, с большей экономией веса и объема (до 60%). Кроме этого, такие машины смогут генерировать электроэнергию с напряжениями линий электропередачи, исключая необходимость установки на генерирующих станциях специальных трансформаторов. Сверхпроводниковые генераторы имеют два преимущества, позволяющих повысить стабильность энергосистемы. Первое - повышение динамической устойчивости за счет более низкого реактивного сопротивления. Второе - повышение статической устойчивости и стабильности напряжения за счет повышения максимально допустимого напряжения при работе с низким возбуждением. Для обычных генераторов синхронное реактивное сопротивление X_d превышает 1,5 p.u. (p.u. = номинальные напряжение/ток машины). X_d сверхпроводникового генератора может быть снижен до 0,3-0,4 p.u., что уменьшит фазовый угол и повысит уровень устойчивости генератора.

В 1970-х годах были предприняты большие усилия по разработке сверхпроводниковых генераторов мощностями до 1250 МВА. Сегодня тенденция в энергосистемах другая – разрабатывать менее мощные генераторы в диапазоне 250 МВА. Хотя некоторые преимущества очень крупных сверхпроводниковых генераторов будут утеряны, несколько менее мощных блоков обеспечат большую надежность при сохранении КПД и поддержании повышенной стабильности системы. Среди программ по разработке сверхпроводниковых генераторов можно упомянуть японский проект SuperGM по созданию генератора 200 МВт [7] с НТСП ротором, который прошел полномасштабные заводские испытания (табл. 2), и серию российских сверхпроводниковых генераторов мощностью 20-220 МВт, которые также прошли испытания в системе Ленэнерго (С-Петербург).

Таблица 2 Характеристики сверхпроводникового генератора мощностью 70 МВт

Параметр	Величина
Номинальная мощность	83 МВА
Номинальное напряжение	10 кВ
Номинальный ток	4792 А
Ток возбуждения	2872 А
Плотность тока в обмотке возбуждения	160 А/мм^2
Максимальная индукция	4,0 Т
Коэффициент мощности	0,9
Частота	60 Гц
Частота вращения	3600 об/мин
Внешний диаметр теплого демпфера	880 мм
Длина магнитного экрана	1500 мм
Расстояние между опорами	4900 мм
Обмотка якоря - равносекционная (двойной слой)	
Охлаждение обмотки якоря	водяное
Скорость возбуждения	0,1 pu/c (300 A/c)
Диаметр ротора	890 мм
Число катушек обмотки возбуждения	5 на полюс
Длина катушки обмотки возбуждения	1900 мм
Размеры сверхпроводящего провода	7,4 ×2,9 мм^2
Диаметр нити сверхпроводника	1,6 мм
Число нитей сверхпроводника	9
Соотношение Cu/CuNi/NbTi	2 / 1 / 1

Обмотки возбуждения ротора японского проекта SuperGM были изготовлены и испытаны в статических и заводских условиях. Они были устойчивы при токе 3000 А, который является номинальным для машин 70 МВт. Первый срыв СП произошел при токе 4330 А, что составило 93% критического значения (4720 А).

Следует отметить, что у традиционных криогенных генераторов сверхпроводниковой является только обмотка возбуждения, расположенная в немагнитном роторе. Обмотка якоря выполняется из теплой меди и выносится в зазор. Замена теплой обмотки якоря на сверхпроводящую и массивного ферромагнитного экрана на легкий электромагнитный экран, выполненный из сверхпроводника, находящегося в состоянии полного диамагнетизма, позволяет в полной мере реализовать преимущества сверхпроводников. В табл. 3 представлены параметры турбогенератора ТГВ-300-2 с водяным охлаждением, криотурбогенератора КТГ-300 со сверхпроводниковой обмоткой возбуждения и полностью сверхпроводникового генератора ПСТГ-300 мощностью 300 МВА.

Таблица 4. Параметры традиционного и сверхпроводниковых тургогенераторов

Тип генератора	ТГВ-300-2	КТГ-300	ПСТГ-300
Индукция в зазоре, Тл	0,93	1,19	0,35
Линейная нагрузка, кА/см	1,5	2,3	8,45
КПД, %	98,7	99,3	99,8
Длина, м	12,3	10,73	9,72
Ширина, м	4,82	4,40	4,10
Высота, м	6,00	4,90	4,30
Вес, т	370	180	91

ВТСП трансформаторы обещают значительное улучшение общих рабочих характеристик электроэнергетической системы. К ожидаемым преимуществам относятся [8]:

- огромная перегрузочная способность с высокой стойкостью изоляции,
- практически неограниченный срок службы трансформатора,
- уменьшенные размеры и вес, повышенный КПД,
- незначительное воздействие на окружающую среду
- легкость выбора места для размещения.

Предполагается, что в ВТСП трансформаторах потери будут менее 0,25 % от общего номинала. В табл. 4 приведены параметры традиционного и сверхпроводниковых трансформаторов мощностью 30 МВА. В настоящее время в мире выполняется несколько программ по разработке сверхпроводниковых трансформаторов. Одна из программ выполняется группой в составе IGC, Waukesha Electric и ORNL. Они разработали и построили трехфазный блок на 1 МВА, который сейчас проходит испытания. Если они завершаться успешно, будет построен многоблочный трансформатор вплоть до 30 МВА [8].

В США, Японии, России и других странах ведутся интенсивные разработки технологий производства длинномерных ВТСП кабелей. В табл. 6 представлены некоторые проекты по сверхпроводниковым силовым кабелям и достигнутые результаты [9]. Большинство схем охлаждения для ВТСП кабелей использует простой рефрижератор для жидкого азота с замкнутым циклом циркуляции.

Таблица 5. Параметры трансформаторов мощностью 30 МВА

Параметр	Традиционный трансформатор	ВТСП-трансформатор с криоохладителем	ВТСП-трансформатор с жидким азотом
Плотность тока, А/мм^2	2,5-5	100-1000	100-1000
Изоляция	Трансформаторное масло и бумага	Твердая изоляция	Твердая изоляция и жидкость
Способ охлаждения	Циркуляция масла	Охлаждение за счет теплопроводности, замкнутый цикл	Непосредственное охлаждение, открытый цикл
Полные потери, %	0,4	0,25, включая расходы на охлаждение	0,25, включая стоимость жидкого азота
Масса, т	48	24	16

Таблица 6. Проекты по разработке силовых ВТСП кабелей, 1992-2003 гг.

Организация	Местонахождение	Тип системы	Параметры
Tokyo Electric Power Co.	Токио, Япония	Гибкий, холодный диэлектрик	100 м, Ø3, 66 кВ, 1,25 кА
NKT Denmark	Дания	Гибкий, теплый диэлектрик	30 м, Ø3, 36 кВ, 2 кА
Pirelli-EDF	Франция	Гибкий, холодный диэлектрик	50 м, Ø3, 225 кВ, 2,6 кА
Pirelli-ENEL/Edison SpA	Италия	Гибкий, холодный диэлектрик	30 м, Ø1, 132 кВ, 3 кА
Southwire Co.	Карролл-тон, Джор., США	Гибкий, холодный диэлектрик	30 м, Ø3, 12,5 кВ, 1,25 кА
Pirelli-EPRI	США и Италия	Гибкий, теплый диэлектрик	50 м, Ø1, 115 кВ, 2 кА
Pirelli-DOE SPI	Детройт, Мич., США	Гибкий, теплый диэлектрик	120 м, Ø3, 24 кВ, 2,4 кА

Сверхпроводниковые трансформаторы и кабели сформируют сердце полностью сверхпроводниковой подстанции будущего, важнейшего энергетического объекта [10]. В эту систему можно установить блоки сверхпроводниковых накопителей энергии и прерыватели тока КЗ. Сегодня способность ограничивать максимальный ток в подсистеме во время повреждения обычно обеспечивается рядом механических прерывателей, которые работают на протяжении нескольких циклов и на короткий период требуют нулевой ток. Существует несколько конструкций больших сверхпроводниковых ограничителей тока, которые удержи-

вают ток на приемлемом уровне на доле цикла и могут срабатывать многократно [11]. Для достижения соответствующего качества электроэнергии часто требуется использование накопителей энергии. Сверхпроводимость может дать две технологии накопителей энергии [12]. Одна из них - сверхпроводниковые магнитные накопители энергии и вторая – это специальные маховики, которые вращаются с очень большой скоростью и поддерживаются и удерживаются магнитными подшипниками, в которых используются сверхпроводники (табл.6). При использовании сверхпроводника накопление энергии осуществляется фактически без потерь. Выпрямители обеспечивают связь между электромагнитом постоянного тока и электрической сетью переменного тока. Этот метод исходно задумывался как метод аккумулирования большого количества излишней энергии, генерируемой ночью для потребления в дневное время при пиковых нагрузках. Однако, прогресс в криогенной технике и сверхпроводимости такой, что сегодня возможно построение сверхпроводниковых магнитных накопителей энергии для улучшения качества энергии небольшого объема.

Таблица. 7. Сравнение потерь в маховиках с обычными и сверхпроводниковыми подшипниками

Тип подшипника	Общие потери, доля от K_{Emax}/час	Время накопления, час	Чувствительность к нарушению баланса
Механический	0,1 – 0,9	<1	максимальная
Активный и пассивный магнитный	0,01	10	небольшая
Сверхпроводниковый	0,001	100	минимальная

Кроме этого, сверхпроводниковые накопители энергии могут эффективно использоваться, для пуска и ускорения достаточно массивных объектов, как, например, линейный синхронный двигатель со сверхпроводниковыми обмотками возбуждения [13].

Применение сверхпроводимости в транспорте наиболее продвинулось в системе высокоскоростных наземных перевозок на основе магнитолевитирующих поездов. Наиболее впечатляющие результаты достигнуты у Японии, где в апреле 1999 г состав MLX01 из пяти вагонов достиг скорости 552 км/час. Также большое внимание уделяется в настоящее время разработке сверхпроводниковых униполярных электродвигателей для силового привода судов [14].

ВЫВОДЫ

Сверхпроводимость в настоящее время рассматривается как одна из наиболее перспективных технологий, позволяющая существенно улучшить параметры традиционных электромеханических устройств, создать новые конструкции и типы. Наблюдается возрастающий интерес во многих странах к практическому внедрению сверхпроводимости в различные виды электрических машин. За последнее время расширился диапазон электромеханических устройств, в которых сверхпроводниковой является не только обмотка возбуждения, но и якорные обмотки переменного тока. Разработаны промышленные конструкции и испытаны опытные образцы основных типов сверхпроводникоых электрических машин.

ЛИТЕРАТУРА

[1] А.В. Иванов-Смоленский, И.П. Копылов, Е.М. Лопухина, "Перспективы развития электромеханики в XXI веке", *Электротехника*, № 8, сс. 1-4, 2000.

[2] Н.А. Черноплеков, "Сверхпроводниковые технологии: современное состояние и перспективы промышленного применения", *Вестник Российской академии наук*, том 71, №4, с. 303-319, 2001.

[3] C.H. Rosner, "Superconductivity: star technology for the 21st century", *IEEE* Trans. *Applied Superconductivity*, vol.11, №1, pp. 39-48, 2001.

[4] В.Г Данько, В.Ф. Болюх, "Стан і перспективи над провідникових пристроїв", *Новини енергетики*, №12, с.45-50, 1999.

[5] Л.К. Ковалев, В.Н. Полтавець, Л.А. Егошкина и др., "Многодисковый гистерезисный электродвигатель на основе объемных высокотемпературных сверхпроводников", *Электричество*, №3, с. 33-42, 1998.

[6] D. Driscoll, V. Dombrovski, B. Zhang, "Development status of superconducting motors", *IEEE Power Engineering Review*, vol.20, №5, pp. 12-15, 2000.

[7] T. Shimada, M. Shibuya, R. Takahashi, et al, "Recent Progress on 70 MW Class Superconducting Generators", *IEEE* Trans. *Applied Superconductivity*, vol 9, №2, pp. 1189-1192, 1999.

[8] B.W. McConnel, S.P. Mehta, M.S. Walker, "HTS transformers", *IEEE Power Engineering Review*, vol.20, №6, pp. 7-11, 2000.

[9] W.V. Hassenzahl, "Superconductivity, an enabling technology for 21st century Power Systems?", *IEEE* Trans. *Applied Superconductivity*, vol.11, №1, pp. 1447-1453, Mar. 2001.

[10] W.V. Hassenzahl, "More Applications of superconductivity to electric power systems", *IEEE Power Engineering Review*, vol.20, №6, pp. 4-6, 2000.

[11] E.M. Leung, "Superconducting fault current limiters", *IEEE Power Engineering Review*, vol.20, №8, pp. 15-18, 30, 2000.

[12] W. Buckles, W.V. Hassenzahl, "Superconducting magnetic energy storage" *IEEE Power Engineering Review*, vol.20, №5, pp. 16-20, 2000.

[13] А.М. Рубинраут, Н.В. Бурбаева, "Пуск линейного синхронного электродвигателя, работающего от сверхпроводникового накопителя энергии", *Электричество*, №7, с. 31-35, 1998.

[14] Г.А. Жемчугов, В.К. Калашников, В.А. Круглин, "Этапы создания и перспективы развития систем электродвижения судов", *Электричество*, №4, с. 46-51, 2000.