

Высокотемпературные сверхпроводники на железнодорожном транспорте

Явление сверхпроводимости открыто еще в начале XX в., однако первые высокотемпературные сверхпроводящие материалы были получены в 1986 г. Расширению их применения способствовали создание получаемых методом плавки материалов, состоящих из сплава RE-Ba-Cu-O (редкоземельные элементы/барий/медь/кислород) и характеризующихся высоким значением критической плотности тока при температуре 77 К в сильном магнитном поле, а также разработка сверхпроводящих кабелей, выполненных из сплава Bi-Sr-Ca-Cu-O (висмут/стронций/кальций/медь/кислород) с оболочкой из серебра. Как полагают, сверхпроводниковые технологии внесут в XXI в. свой вклад в решение глобальных проблем охраны окружающей среды и экономии энергии.

Широкий диапазон возможностей сверхпроводниковых технологий на транспорте можно проиллюстрировать, в частности, использованием соответствующих материалов в системе магнитного подвеса (магнитной левитации), где они необходимы для изготовления обмоток мощных электромагнитов (в настоящее время ведутся исследования по практическому внедрению этой технологии). Вообще же сверхпроводниковые технологии можно применять на электрифицированных железных дорогах во многих сферах, таких, как генерирование, передача, преобразование, хранение электроэнергии и подача ее на силовое электрооборудование подвижного состава (токоъем). Однако должно пройти некоторое время перед тем, как оборудование, выполненное на базе сверхпроводящих материалов, начнет применяться в широких масштабах, поскольку перед заменой существующего оборудования на новое необходимо решить ряд технических проблем, а также найти те

задачи и функции, которые не могут быть решены или реализованы с помощью традиционных технологий. Тем не менее сверхпроводниковые технологии рассматриваются как ключевые для промышленности XXI в.

Ниже рассмотрены свойства высокотемпературных сверхпроводников и возможность применения их на электрифицированных железных дорогах, например в тяговых трансформаторах электроподвижного состава, маховиковых и сверхпроводящих магнитных накопителях энергии и кабелях.

Высокотемпературные сверхпроводники

Сверхпроводники типа RE-Ba-Cu-O

Современный высокотемпературный, т. е. имеющий высокую критическую температуру T_c (температуру перехода в сверхпроводящее состояние), сверхпроводник представляет собой керамический

материал промышленного изготовления, а по химическому составу — оксид. Со времени создания первых таких материалов на основе лантана, особенно после разработки систем на основе таких элементов, как иттрий (сверхпроводники типа Y-Ba-Cu-O) и висмут (сверхпроводники типа Bi-Sr-Ca-Cu-O), T_c удалось довольно быстро довести до более чем 90 К (рис. 1). Сверхпроводящие материалы этого типа состоят из тяжелых металлов или редкоземельных элементов (La, Y, Bi и др., которые в совокупности обозначаются как RE), а также бария, меди и кислорода. Однако наиболее высокие значения T_c получены в системах на основе таллия и ртути.

Были также разработаны и другие материалы, в частности не содержащие меди и органические. В то же время до сих пор не созданы сверхпроводники, характеризующиеся критической температурой порядка комнатной; в лучшем случае они функционируют, например, в качестве сверхпроводящих постоянных магнитов, при температуре жидкого азота.

Высокотемпературные сверхпроводники по своей структуре двумерные и обладают анизотропией в кристаллической форме. Эти твердые и хрупкие материалы характеризуются наличием пор, что с самого начала представляло техническую проблему. Механическая обработка таких материалов затруднена, что является стимулом для разработки новых технологий изготовления сверхпроводящих кабелей.

Следует отметить, что после реализации обычных методов спекания для оксидов свойства массивных сверхпроводников типа Y123 или RE123 были значительно улучшены за счет разработки технологии плавления, в которой использован способ отверждения в процессе тепловой обработки, подобный применяемому при отверждении металлов. Это позволило на порядок увеличить критическую плотность тока I_c созданных впослед-

ствии сверхпроводящих материалов типа LRE-Ba-Cu-O (здесь LRE — легкие редкоземельные элементы), таких, как имеющие в своей основе неодим (Nd-Ba-Cu-O) и самарий (Sm-Ba-Cu-O).

Полагают, что в опытной эксплуатации в разных отраслях экономики будут широко использоваться массивные изделия из гомогенных сверхпроводящих материалов. Имеются три направления улучшения характеристик таких материалов, которые должны быть реализованы для удовлетворения требований, сопутствующих их применению: повышение однородности материала, увеличение допустимой токовой нагрузки по плотности тока и магнитному потоку и, наконец, улучшение механических свойств. Так, при изготовлении массивных изделий из сверхпроводников диаметром более 10 см следует обеспечить, чтобы удерживаемое магнитное поле было равно 3 – 5 Т и более при температуре поверхности 77 К (рис. 2).

На рис. 3 приведен образец массивного изделия из сверхпроводящего материала на основе самария (Sm123) в виде единого домена, изготовленного в Научно-исследовательском институте железнодорожной техники Японии (RTRI) с использованием процесса плавки с тонкопленочной кристаллической затравкой из материала Nd123/MgO. В ходе этого эксперимента изготавливались цилиндрические образцы-таблетки диаметром 20 – 30 мм и высотой 5 – 10 мм с номинальным составом Sm-Ba₂-Cu₃-O_x при 5 – 40%-ной молярной концентрации Sm₂-Ba-Cu-O (Sm211), 10% (массовых) Ag₂O и 0,5% (массовых) Pt с использованием в качестве сырья порошка SmO₃, BaCO₃ и CuO. Тонкая пленка материала Nd123/MgO наносилась на поверхность образцов при комнатной температуре перед началом цикла термической обработки по так называемому методу холодного осаждения. Максимальная температура термообработки T_{max} состав-

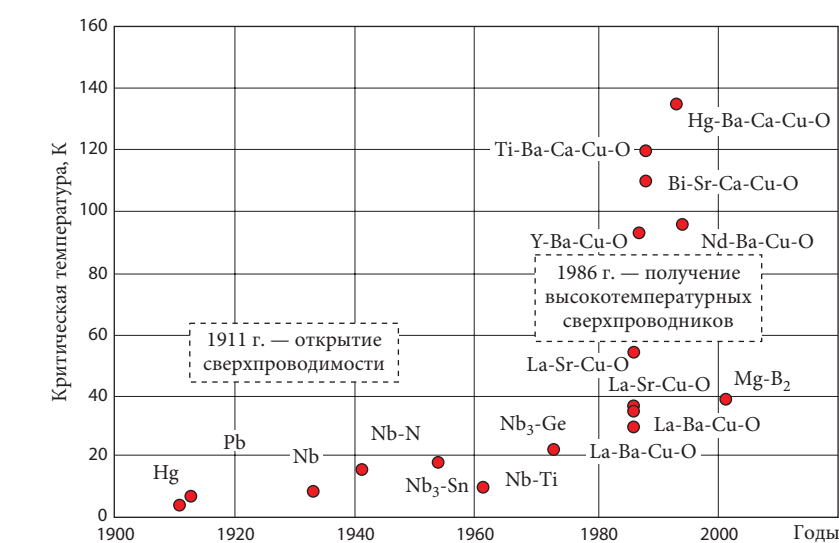


Рис. 1. Изменения величин критической температуры по годам получения соответствующих сверхпроводников

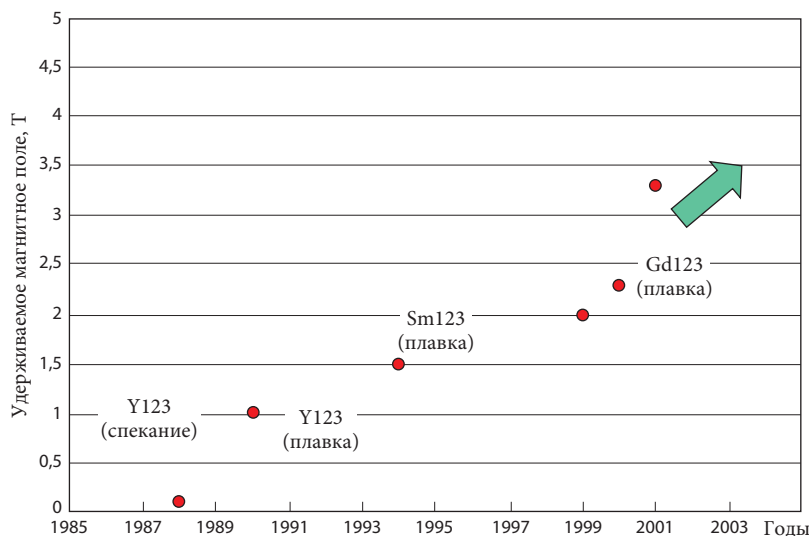


Рис. 2. Изменения величины удерживаемого магнитного поля на поверхности массивных сверхпроводников типа RE123

ляла 1060 – 1100 °С, а температура выдержки T_h — 1020 °С, что соответствовало степени недоохлаждения $\Delta T = 5$ °С. После выдержки образцов в течение 5 – 20 ч они быстро охлаждались до комнатной температуры. При этом с-ось кристалла оказалась почти перпендикулярной поверхности образца.

В заключение следует отметить, что последним достижением в ходе исследований и разработок сверхпроводников типа RE-Ba-Cu-O стало создание проводника из материала Y123 с оболочкой, который представил собой следующее поколение материалов для изготовления

кабелей. Этот материал характеризуется намного более высоким значением плотности тока, чем мате-



Рис. 3. Вид образца из сверхпроводящего материала типа Sm123

Сферы применения высокотемпературных сверхпроводников

Отрасль	Объекты применения
Электроэнергетика	Генераторы, магнитные и маховиковые системы накопления энергии, ядерный синтез, ограничители токов короткого замыкания, трансформаторы, кабели
Промышленность	Синхротронные излучатели, однокристаллические процессоры, магнитные сепараторы, двигатели, электромагнитные мешалки, сверхпроводящие квантовые интерференционные датчики, средства неразрушающего контроля
Транспорт	Системы на магнитном подвесе, подъемники, электромагнитные тормоза, суда с электромагнитными движителями, системы запуска космических аппаратов
Информационные технологии	Компьютеры, фильтры для мобильных коммуникаций, антенны
Медицина	Аппаратура для формирования изображений на основе явления магнитного резонанса, сверхпроводящие квантовые интерференционные датчики, ускорители, магнитные экраны
Фундаментальные науки	Магниты для исследовательских работ, композитные магниты с мощным полем, аппаратура на основе ядерного магнитного резонанса, детекторы частиц, высокочастотные резонаторы, эталоны напряжения, электронные микроскопы

риал на базе висмута, и в настоящее время в Японии, США и ряде европейских стран интенсивно ведутся разработки ленточных проводников с повышенной величиной I_c .

Сверхпроводники типа Bi-Sr-Ca-Cu-O

Японскими учеными разработана система сверхпроводящих материалов на основе висмута (Bi-Sr-Ca-Cu-O), обладающих более высоким значением T_c (около 1100 K) и, как полагают, являющихся наиболее перспективными для использования на практике. Сверхпроводники на основе висмута легче в производстве, чем на основе иттрия, и поэтому сейчас ведутся разработки подобных материалов, ко-

торые призваны в основном заменить уже применяющиеся низкотемпературные сверхпроводники таких типов, как Nb-Ti и Nb-3Sn. Представляется возможным применение сверхпроводников типа Bi-Sr-Ca-Cu-O при температурах от 20 до 77 K, т.е. вплоть до температуры жидкого азота.

Данный материал обладает интересными особенностями, заключающимися в ярко выраженной двумерности кристаллической структуры, более сильной ее связности и способности работать при повышенных токовых нагрузках. Его характеристики по сверхпроводимости полностью удовлетворяют частным требованиям для определенных сфер применения. Так, одной

из основных предполагаемых областей применения этого материала, где его можно использовать в условиях слабых магнитных полей и высоких температур, является тяговое электрооборудование, в первую очередь трансформаторы. Однако такие сверхпроводники трудно применять при температурах, превышающих 77 K, и более сильных магнитных полях, так как в таких условиях I_c материалов на основе висмута по сравнению с материалами на основе иттрия снижается.

Еще одну сферу применения сверхпроводников из материалов на основе висмута представляет изготовление кабелей большой длины с серебряным покрытием. Такие материалы обозначаются как Bi2223 ($Bi_2-Sr_2-Ca_2-Cu_3-O_x$) и Bi2212 ($Bi_2-Sr_2-Ca-Cu_2-O_x$). Одним из наиболее типичных технологических процессов производства таких сверхпроводников является метод «порошок в трубке» (PIT), когда осуществляются повторяющиеся вытяжка и удлинение трубок из серебра или сплава на основе серебра, в которые помещена смесь неочищенного порошка с таким же стехиометрическим соотношением, что и у Bi2223. В данном случае предпочтительнее ленточные кабели, а не с круглым или квадратным сечением. В качестве примера можно назвать кабель сечением 4×0,3 мм и длиной более 1000 м, который изготавливается методом реакции в твердой среде с термической обработкой.

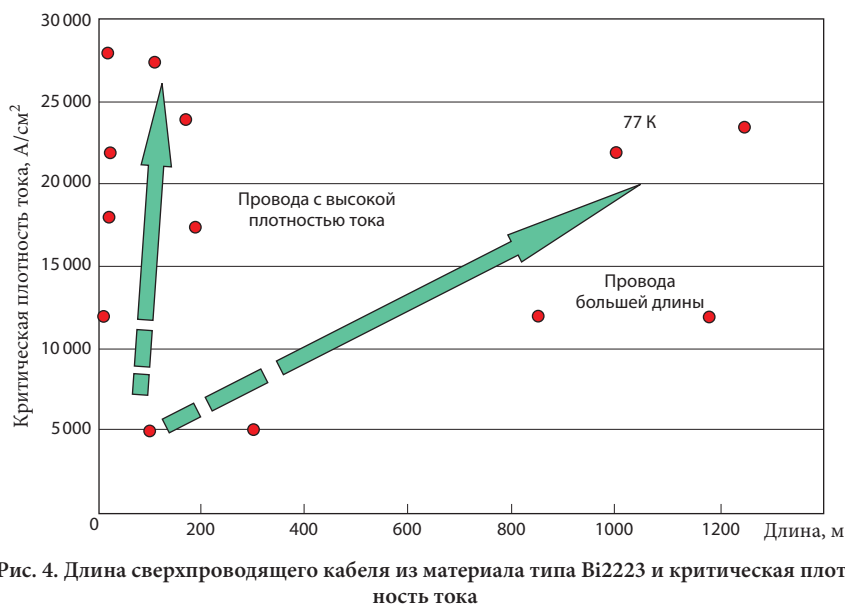


Рис. 4. Длина сверхпроводящего кабеля из материала типа Bi2223 и критическая плотность тока

Свойства сверхпроводников, представляемые показателем I_c , постоянно улучшаются. Удалось получить кабели для работы в условиях высоких температур и слабых магнитных полей и сверхпроводящие магниты большого диаметра для работы в условиях низких температур и средних и сильных магнитных полей. Необходимо и далее совершенствовать эти сверхпроводящие материалы в направлении повышения однородности, прочности и показателя I_c , а также увеличения размеров изготавливаемых из них изделий.

Например, величина критической плотности тока для сверхпроводника типа Bi2223 при 77 К превышает $20\,000\text{ A/cm}^2$, а величина критического тока I_c в изготовленном из этого материала кабеле может превышать 100 А (рис. 4). Следует отметить, что при температуре около 20 К показатель I_c становится выше 200 А, а показатель I_c для образцов небольшой длины достигает $100\,000\text{ A/cm}^2$. Вместе с тем с практической точки зрения намного большую важность представляет величина эффективной критической плотности тока I_c , которая равна приблизительно $9\,000\text{ A/cm}^2$ (параметр I_c определяется путем деления величины тока на общее поперечное сечение проводника и зависит от количественного соотношения используемого серебра и окружающей сверхпроводящей фазы висмута). Полагают, что указанные характеристики будут постепенно улучшаться по мере внедрения новых технологий, позволяющих уменьшить долю серебра в материале.

Сферы применения высокотемпературных сверхпроводников

По мнению экспертов, ряд сверхпроводниковых систем получит широкомасштабное применение. Достигнут определенный прогресс в исследованиях и разработках по этой проблеме, и сфера ис-

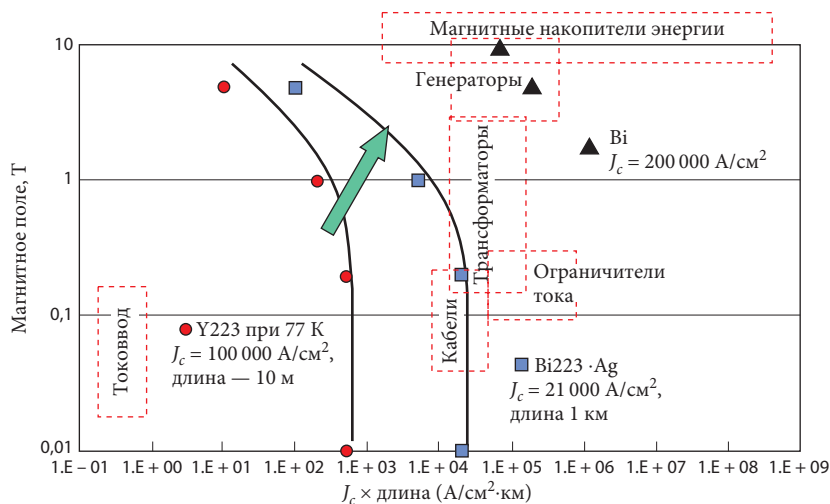


Рис. 5. Требования к параметрам сверхпроводников, используемых в электроэнергетике и электротехнике

пользования сверхпроводников постоянно расширяется и охватывает не только электроэнергетику и электротехнику, но и транспорт и другие отрасли экономики в Японии и других странах. В таблице показаны некоторые сферы применения высокотемпературных сверхпроводников, включая, например, технологию формирования изображений на основе явления магнитного резонанса. Потенциал сверхпроводников неоспорим, и ожидается появление новых технических решений в этой области.

На рис. 5 показаны параметры, которые необходимо обеспечить для применения сверхпроводников в силовом электротехническом оборудовании и кабелях. Эти требования относительно невысоки для токоведущих частей и гораздо строже для сверхпроводниковых магнитных накопителей энергии. Сверхпроводники на основе висмута по своим характеристикам в наибольшей степени соответствуют требованиям, предъявляемым к кабелям, но хуже подходят для других сфер применения.

В наибольшей степени применимы высокотемпературные сверхпроводники, лучше удовлетворяющие установленным требованиям. Поэтому исследования и разработки направлены на создание материалов, сохраняющих требуемые характеристики без необходимости

в охлаждении до сверхнизких температур. Вместе с тем для обеспечения использования возможно более широкого типажа сверхпроводников принимаются меры для снижения температуры среды, в которой работает оборудование из сверхпроводящих материалов. Так, металлические сверхпроводники с низким значением показателя T_c применяются, главным образом, в магнитных накопителях энергии, где они служат в качестве магнитных опор, а также в генераторах, магнитах и т. д.

С точки зрения другого важного показателя — I_c сверхпроводящие материалы на основе Y-Ba-Cu-O с покрытием, как отмечено выше, предпочтительнее материалов на основе висмута, но кабели из первых в настоящее время имеют длину меньше, чем кабели из последних. Ожидается, что будут разработаны сверхпроводящие материалы на основе иттрия, из которых при столь же высоком показателе I_c можно будет изготавливать кабели большей длины.

Представляют также интерес массивные сверхпроводящие магниты, в которых используется свойство удержания сильных магнитных полей, а также применение сверхпроводящих материалов в электромагнитной сепарации как в одном из направлений по охране окружающей среды.

Применение сверхпроводников на железнодорожном транспорте

Есть несколько вариантов применения сверхпроводниковых технологий на железных дорогах, и наиболее впечатляющим является пример их использования в транспортных системах на магнитном подвесе (Maglev в Японии, Transrapid в Германии). Здесь сверхпроводники могут интегрироваться в магниты, токоведущие элементы структуры и экранирующие устройства.

Кроме того, известно, что на электрифицированных железных дорогах необходимо выполнять такие основные функции, как генерирование, передача, трансформация и аккумулирование электроэнергии и преобразование ее в кинетическую энергию. Работающие в регламентированных режимах электронные системы управления движением поездов и связи также являются важным фактором в обеспечении безопасности и надежности эксплуатационной деятельности железнодорожного транспорта. Для проверки технического состояния и работоспособности подвижного состава, путевой структуры, искусственных сооружений и других объектов важны методы неразрушающего контроля (дефектоскопии). Во всех этих сферах возможно применение сверхпроводниковых технологий.

На традиционных железных дорогах такие технологии можно использовать, например, в тяговых трансформаторах электроподвижного состава, в магнитных (SMES) и маховиковых накопителях энергии, кабелях и т. п. При осуществлении неразрушающего контроля можно применять квантовые интерференционные датчики (SQUID). Кроме того, сюда можно отнести и электромагнитную сепарацию, аварийные ограничители тока (FCL), двигатели и исполнительные механизмы различных систем привода.

Тяговые трансформаторы

При проектировании подвижного состава железных дорог решающим фактором является его облегчение, так как это позволяет обеспечить экономию энергии и снизить расходы на содержание инфраструктуры. Весьма привлекательным решением в этом аспекте можно назвать использование сверхпроводящих тяговых трансформаторов электроподвижного состава переменного тока, так как такие трансформаторы, даже вместе с их криогенными охладителями, криостатами и запасом жидкого азота, будут иметь меньшую массу по сравнению с обычными медно-железными трансформаторами.

Была исследована возможность реализации данного решения. Главными критериями при разработке трансформатора на базе высокотемпературных сверхпроводниковых технологий для подвижного состава считаются быстрдействие, безопасность, надежность, малое воздействие на окружающую среду и низкие расходы на техническое обслуживание.

Так, в отношении силовых трансформаторов, устанавливаемых на высокоскоростных электропоездах Shinkansen, необходимо учитывать следующие ограничительные и функциональные факторы:

- необходимость минимизации массы;
- относительно небольшая (несколько мегаватт) мощность по сравнению с трансформаторами, применяемыми в электроэнергетике;
- номинальные значения напряжения (25 кВ в первичной обмотке) и тока (приблизительно 1 кА во вторичной обмотке);
- однофазность;
- возможность кратковременных прерываний подачи электропитания и возникновения сильных переходных токов при пересечении границ между фидерными участками контактной сети;

- присутствие гармонических компонентов в токе во вторичной обмотке, обусловленное тем, что эта обмотка соединена с полупроводниковым силовым преобразователем;

- наличие ограничения по высоте при размещении под кузовом вагона;

- подверженность механическим вибрациям и ударным нагрузкам при движении поезда.

В ходе проектирования опытного высокотемпературного сверхпроводникового тягового трансформатора выяснилось, что его масса может быть меньше массы обычного трансформатора, рассчитанного на ту же (несколько мегаватт) мощность, если удастся снизить потери переменного тока в сверхпроводящем кабеле, изготовленном из материала на основе висмута. Эти потери во многом определяют общую массу трансформатора, главным образом, потому, что потребная производительность системы охлаждения зависит от рассеивания тепловой энергии из-за указанных потерь, а масса самой системы охлаждения в свою очередь зависит от ее производительности.

Магнитные накопители энергии

Аккумулирование электроэнергии является значимым технологическим аспектом ближайшего будущего из-за важности проблем, связанных с охраной окружающей среды и сокращением расходов природных ресурсов при генерировании энергии. Согласно прогнозам, потребность в повышении эффективности использования электроэнергии за счет применения накопителей энергии, имеющих большую энергоемкость и способных работать в долговременном режиме, будет особенно явственна на линиях городских железных дорог вследствие значительных нагрузок при интенсивном движении поездов в утренние и вечерние часы пик. Также ожидается повышение эффективности использования энергии рекупера-

тивного торможения, которое в последнее время получило широкое распространение.

Системы с накопителями на основе сверхпроводниковых технологий (SMES) обеспечивают сохранение электроэнергии в виде магнитной энергии и характеризуются высокой эффективностью, быстрым заполнением емкости и отдачей электроэнергии. Такие системы могут применяться в целях выравнивания энергетических нагрузок и сглаживания их пиков, стабилизации работы электросистем, а также выполнять роль резерва электрической мощности.

Эксперты по системам SMES сообщили о разработке концептуального проекта высокотемпературного накопителя SMES емкостью несколько мегаватт-часов электроэнергии, предназначенного для стабилизации питания высокоскоростных электропоездов. Как было отмечено, в данном случае выравнивание нагрузок может быть обеспечено с помощью SMES емкостью 0,5 МВт·ч. Рассматривался, в частности, накопитель энергии тороидальной формы диаметром в несколько метров, рассчитанный на размещение под железнодорожными эстакадами.

В качестве второго примера можно назвать концептуальный проект SMES для транспортной системы типа Maglev с использованием сверхпроводящих кабелей из материала на основе ниобия и титана. Однако результаты недавних исследований показали, что в SMES тороидального типа емкостью в несколько мегаватт-часов лучше использовать сверхпроводящие кабели нового поколения из материала типа Y-Ba-Cu-O. В процессе подготовки рекомендаций по выбору размера и числа катушек эксперты в расчетах принимали во внимание такие параметры системы Maglev, как скорость движения поездов и межпоездные интервалы, расположение тяговых подстанций и максимальная электрическая мощность каждой из них.

Маховиковые накопители энергии

Маховики обеспечивают накопление энергии за счет преобразования электрической энергии в механическую энергию вращения. Они наиболее эффективны при высокой частоте вращения. Обратный процесс отдачи накопленной энергии осуществляется путем преобразования энергии вращения в электрическую, что позволяет использовать маховики в качестве средств выравнивания энергетических нагрузок.

Уменьшение механических потерь при аккумулировании электрической энергии в течение нескольких часов может быть достигнуто за счет обеспечения свободного вращения маховика без непосредственного контакта с опорами, в конструкцию которых интегрированы высокотемпературные сверхпроводники, в то время как традиционный механический маховик вследствие больших потерь из-за трения в опорах может запасать энергию в течение гораздо меньшего времени, обычно измеряемого секундами.

Работа такого энергоэффективного маховика основана на технологии магнитного подвеса с использованием принципа захвата магнитного потока. В данном случае в качестве ротора использован постоянный магнит, а в статоре применены массивные сверхпроводниковые элементы из материала на основе оксидов.

Промышленность выпускает маховиковые накопители энергии емкостью 0,5–1 кВт·ч. Организация разработки новых энергетических и промышленных технологий (NEDO) на основе проведенных исследований спроектировала и подготовила к производству маховиковый накопитель среднего класса, рассчитанный на емкость 10 кВт·ч, и предполагает создать в предвидимом будущем накопитель на 100 кВт·ч.

На железнодорожном транспорте такие маховиковые накопители

могут применяться для аккумулирования энергии рекуперативного торможения и сглаживания колебаний напряжения в питающих сетях. Кинетическая энергия одного поезда, движущегося по обычной железнодорожной линии, составляет порядка 100 МДж. На одной из тяговых подстанций постоянного тока на линии Keihin-Kyukoh в Японии для регулирования напряжения используется маховик на механических опорах емкостью 90 МДж (25 кВт·ч).

Силовые кабели

Для создания высокотемпературных сверхпроводящих электрических кабелей требуются сверхпроводящие материалы, характеризующиеся высоким значением плотности тока и создающие сравнительно слабое магнитное поле. Интенсивные разработки высокотемпературных сверхпроводящих силовых кабелей ведутся в настоящее время во всем мире. В Японии одной из электрогенерирующих компаний создан концептуальный образец линии электропередачи, рассчитанной на ток величиной порядка 9000 А и напряжение 66 кВ. Используемый в этой линии сверхпроводящий кабель имеет диаметр 130 мм и рассчитан на мощность 1000 МВ·А при температуре 77 К.

В Японии на электрифицированных железных дорогах используются системы тягового электрооборудования однофазного переменного тока напряжением 20 или 25 кВ коммерческой частоты 50 или 60 Гц и постоянного тока напряжением 1,5 кВ. Применение сверхпроводящих силовых кабелей, даже несмотря на необходимость охлаждающих устройств, обеспечит здесь снижение потерь энергии при передаче и компактность компоновки силового электрооборудования с более эффективным использованием имеющегося пространства.

H.Fujimoto. Quarterly Report of RTRI, 2004, № 4, p. 197 — 202.