

УДК 629.01: 621.313

## СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ НА ТРАНСПОРТЕ

А.И. Хожайнов, В.В. Никитин, Г.Е. Серeda

### Аннотация

Рассматривается современное состояние, достигнутые результаты и перспективы применения сверхпроводниковой техники в транспортных энергетических установках.

**Ключевые слова:** сверхпроводниковые устройства, транспортные энергетические установки, магнитное поле, электромагнитная совместимость.

### Введение

В 1911 году голландский физик Г.Каммерлинг-Оннес открыл явление сверхпроводимости, обнаружив, что при температуре жидкого гелия (4,2К) ртуть переходит в особое (сверхпроводящее) состояние, характеризующееся полным отсутствием сопротивления электрическому току (нобелевская премия 1913 г.). В последующие годы появились сотни металлических сплавов и соединений, обладающих сверхпроводимостью при весьма низких температурах. Часть из них на основе ниобия нашла широкое применение при создании опытных сверхпроводниковых электротехнических устройств, работающих на постоянном токе. Важным достижением в области технической сверхпроводимости явилось создание сверхпроводников для работы на переменном токе. Такие проводники выдерживают изменение магнитного поля со скоростью до 400 Тл/с и транспортного тока до 25 кА/с (Глебов И.А. и др., 1985) без заметного ухудшения критических параметров (Франция, фирма «Альстом-Атлантик»). В 1987 г. А. Мюллером и Д. Беднорцем (нобелевская премия 1987 г.) была открыта металло-оксидная керамика, обладающая сверхпроводящими свойствами при температуре 90 К, что позволяет в качестве криогенной жидкости использовать жидкий азот (77К). Такие сверхпроводники получили название высокотемпературных. Использование жидкого азота в качестве криогенной жидкости позволяет упростить конструкцию криостата, в котором расположена сверхпроводящая обмотка, повысить надежность работы устройств, увеличить безопасность их обслуживания и на порядок снизить эксплуатационные расходы.

## **1. Направления использования технической сверхпроводимости в транспортных энергетических установках**

Важнейшими требованиями, определяющими дальнейшее развитие всех видов транспорта, являются повышение экономичности транспортных энергетических установок (ТЭУ), надежности их работы при жестких требованиях по охране окружающей среды. Стратегическим направлением совершенствования ТЭУ и повышения их экономической эффективности является применение сверхпроводящих магнитных систем (СПМС).

СПМС могут использоваться в ТЭУ в качестве бортовых электромагнитов левитации и тяги в системах высокоскоростного наземного транспорта, систем возбуждения мощных электрических машин, обмоток индуктивных накопителей энергии, а также систем возбуждения магнитогидродинамических движителей судов.

Опытные транспортные установки с применением СПМС начали создаваться в 1960-х годах. К ним в первую очередь следует отнести высокоскоростной наземный транспорт (ВСНТ) на электродинамическом подвесе (ФРГ, Япония).

Применение сверхпроводников в системах возбуждения мощных электрических машин позволяет увеличить их предельную мощность, уменьшить массу и габариты и поднять КПД электрических машин (Глебов И.А. и др., 1980; под ред. Н.Н. Шереметьевского, 1985). В этой связи перспективным признано применение сверхпроводниковых электрических машин (СПЭМ) в составе тяговых передач наземных колесных транспортных средств (локомотивов, мощных электромобилей) и в системах электродвижения судов. Опытные морские суда со сверхпроводниковыми электрическими машинами были созданы в США и Великобритании в 1970-1980-х годах.

Создание принципиально новых систем электродвижения судов – магнитогидродинамических движителей возможно только с применением сверхпроводящих магнитов. Данные системы позволяют при приемлемой скорости движения судна существенно уменьшить массу и габариты энергетической установки. Такой принцип движения реализован в Японии на экспериментальном судне «Ямато» с магнитогидродинамическим движителем каналового типа.

Специального внимания заслуживает применение сверхпроводниковых индуктивных накопителей энергии (СПИН), главными достоинствами которых являются требуемое время хранения запасенной энергии и практически неограниченное количество зарядно-разрядных циклов, что позволяет использовать их в составе ТЭУ для повышения энергетической эффективности. В первую очередь это относится к ТЭУ транспортных средств,двигающихся по пересеченной местности или с частыми пусками и остановками.

К настоящему времени в иностранной и отечественной литературе опубликовано большое количество работ, посвященных оценке использования сверхпроводникового оборудования в ТЭУ. Во многих технически развитых странах мира создано несколько десятков опытных образцов СПЭМ различных типов, в том числе с использованием высокотемпературных сверхпроводников.

## 2. Применение сверхпроводниковых электрических машин и индуктивных накопителей энергии в ТЭУ

С 1980 года на кафедре «Электротехника» ПГУПС (ЛИИЖТ) проводятся теоретические и экспериментальные исследования по использованию СПМС в транспортных системах. Исследования ведутся в двух направлениях: по применению сверхпроводящих магнитов для левитации и тяги ВСНТ с электродинамическим подвесом и по применению СПМС для наземных колесных видов транспорта.

По первому направлению разработана теория электродинамической левитации и специальные установки с подвесом данного типа, выполнены также отдельные эксперименты (Кочетков В.М. и др., 1981).

Теоретические исследования по второму направлению показали, что применительно к перспективному тепловозу с энергетической установкой мощностью 6000 кВт тяговая электрическая передача со СПЭМ имеет более высокий КПД, чем аналогичные передачи с традиционными электрическими машинами постоянного тока.

Одним из путей дальнейшего повышения энергетической эффективности тяговых передач автономных транспортных объектов является применение сверхпроводниковых индуктивных накопителей энергии (СПИН), обеспечивающих накопление электроэнергии (заряд), генерируемой тяговыми сверхпроводниковыми двигателями при торможении транспортных объектов и ее отдачу (разряд) совместно со сверхпроводниковым генератором электродвигателям в режиме тяги (Хожаинов А.И. и др., 1996). Основным режимом, обеспечивающим энергосбережение для магистрального автономного локомотива, является режим движения по участку пути переменного профиля со скоростью  $V=\text{const}$ . Выражения, описывающие процесс преобразования потенциальной энергии транспортного объекта при движении по спуску в энергию магнитного поля СПИН имеют вид ( $I_0$ ,  $\Phi_0$  – начальные значения тока СПИН и магнитного потока двигателя):

$$i_H = \sqrt{\left( I_0^2 - M_1 T_E \right) \exp\left( -\frac{2t}{T_E} \right) + M_1 T_E} ;$$

$$\Phi = \left\{ \sqrt{\left[ \left( \frac{1}{\Phi_0} \right)^2 - M_2 T_E \right] \exp\left( -\frac{2t}{T_E} \right) + M_2 T_E} \right\}^{-1},$$

$$\text{где } M_1 = (A + BV + F_{CO})V \eta_p; \quad M_2 = \frac{C_1 \tilde{C}_2 V}{L(A + BV + F_{CO})}.$$

$$T_E = \frac{L}{R}; \quad C_1 = \frac{\varepsilon C_e}{\pi D_K}; \quad \tilde{C}_2 = \frac{2\varepsilon C_M}{D_K \eta_p};$$

$A, B$  – постоянные коэффициенты линейной аппроксимации зависимости силы сопротивления движению от скорости;

$F_{CO}$  – суммарная сила сопротивления движению, не зависящая от скорости;

$L, R$  – индуктивность и сопротивление цепи заряда накопителя;

$\varepsilon$  – Передаточное отношение тягового редуктора;

$C_M, C_e$  – конструктивные постоянные тягового двигателя;

$D_K$  – диаметр ведущего колеса;

$\eta_p$  – к.п.д. тягового редуктора.

Основываясь на приведенных формулах, установлено, что применительно к перспективному автономному локомотиву мощностью 6000 кВт со сверхпроводниковым оборудованием, обеспечивающему движение поезда массой 3000 т по участку протяженностью 100 км с III типом профиля пути применение СПИН позволит сэкономить до 12% топлива. Из известных вариантов конструктивного исполнения СПИН предпочтение должно быть отдано тороидальной конструкции для исключения вредного влияния внешних магнитных полей на окружающую среду.

### 3. Проблема электромагнитной совместимости сверхпроводникового и традиционного оборудования в ТЭУ

СПМС принципиально позволяют решить ряд ключевых проблем транспортной энергетики, однако обладают определенной спецификой – наличием сильных внешних магнитных полей (ВМП), постоянных или медленно изменяющихся. В связи с тем, что проблема взаимодействия ВМП СПМС с прочим оборудованием является чрезвычайно важной для транспортных объектов, было сформулировано научное направление по исследованию проблем электромагнитной совместимости тягового сверхпроводникового оборудования со вспомогательным

электрооборудованием традиционного исполнения, размещенным в ограниченном пространстве транспортного объекта.

На этапе теоретических исследований была построена модель электромагнитного взаимодействия СПМС и традиционной электрической машины с ферромагнитопроводом и малым воздушным зазором. Задача сводится к определению радиальной компоненты результирующего магнитного поля в воздушном зазоре, обусловленного суммарным воздействием поля возбуждения и внешнего магнитного поля СПМС. В линейной двумерной постановке данная задача решается путем интегрирования уравнения Лапласа для магнитного потенциала, которое дает следующее выражение для нормальной компоненты напряженности результирующего поля в воздушном зазоре (Хожаинов А.И. и др., 2003):

$$H_r = \frac{1}{r} \sum_{m=1}^{\infty} m \left\{ \begin{aligned} & \left( \left( \frac{r}{b} \right)^m K_{1m} - r^m A_m + r^{-m} C_m \right) \sin m\theta + \\ & + \left( - \left( \frac{r}{b} \right)^m K_{2m} - r^m D_m + r^{-m} E_m \right) \cos m\theta \end{aligned} \right\},$$

где  $K_{1m}, K_{2m}$  – функции источника собственного поля электрической машины;

$A_m, C_m, D_m, E_m$  – постоянные величины, являющиеся функциями всех источников магнитного поля (собственного и внешнего).

Установлено, что статор электрической машины в значительной степени обладает экранирующими свойствами и граница зоны нечувствительности электрической машины к ВМП является достаточно ярко выраженной.

Для учета нелинейных свойств ферромагнитопроводов электрических машин, их конечных продольных размеров, а также геометрических параметров реальных источников поля созданы трехмерные численные нелинейные математические модели (Никитин В.В., 2003 г.).

Теоретические и экспериментальные исследования влияния ВМП СПМС на электромагнитные аппараты показали, что влияние ВМП может проявляться в ложном срабатывании аппарата при обесточенной втягивающей катушке, однако зону нечувствительности к внешнему полю в данном случае можно существенно расширить, подбирая оптимальную ориентацию магнитной системы ЭМА по отношению к вектору ВМП.

#### 4. Заключение

Обозначенные вопросы и выполненные исследования (Хожаинов А.И. и др. Цикл статей) не исчерпывают широкого круга проблем, связанных с

использованием сверхпроводимости на транспорте. Среди важных проблем, требующих решения, следует назвать: необходимость разработки конструкций СПЭМ с пониженным уровнем ВМП, оптимизацию сверхпроводящих катушек по массе и габаритам, разработку СПИН с возможностью регулирования энергоёмкости в зависимости от условий движения и ряд других.

### 5. Литература

- Глебов И.А., Шахтарин В.Н., Антонов Ю.Ф. Проблема ввода тока в сверхпроводниковые устройства. Наука, 1985.
- Глебов И.А., Лаверик Ч., Шахтарин В.Н. Электрофизические проблемы использования сверхпроводимости. Наука, 1980.
- Криогенные электрические машины. Под ред. Шереметьевского Н.Н. Энергоатомиздат, 1985.
- Кочетков В.М., Ким К.И., Трещев И.И. Теория электродинамической левитации. Основные результаты и дальнейшие задачи. Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. 1981, № 1.
- Хожаинов А.И., Никитин В.В. Автономная тяговая электрическая передача со сверхпроводниковыми электрическими машинами и индуктивным накопителем энергии. Электричество, 1996, № 10.
- Хожаинов А.И., Никитин В.В. Электромагнитная совместимость сверхпроводниковых и традиционных электрических машин. Электричество, 2003, № 5.
- Никитин В.В. Проблема электромагнитной совместимости сверхпроводникового и традиционного оборудования на транспорте. V международный симпозиум по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии. Сборник научных докладов. Санкт-Петербург, 2003.
- Хожаинов А.И. и др. Цикл статей по применению сверхпроводимости на транспорте. Железнодорожный транспорт, 1987, № 7; 1992, № 6; 1996, № 5; 1998, № 5; 1999, № 7; 2003, № 7.

УДК 621.331:621.311

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЯГОВЫХ ЦЕПЕЙ

Е.Ф. Жигалко, А.Н. Бестужева

### Аннотация

Рассматриваются алгоритмы расчёта параметров электроснабжения участка электрической железной дороги, учитывающие новые схмотехнические решения, вычислительные ресурсы и направления применения результатов. Моделирование квазистационарных режимов электроснабжения участка с тяговыми и