

# Разработка трансформатора со сверхпроводниковыми обмотками для электроподвижного состава

Специалистами Японского научно-исследовательского института железнодорожной техники (RTRI), Университета Кюсю, компаний Fuji Electric и Taiyo Nippon Sanso создан опытный образец сверхпроводникового трансформатора для электроподвижного состава железнодорожного транспорта.

Трансформатор имеет первичную, четыре вторичные и одну третичную обмотку, выполненные с применением проводов из высокотемпературного сверхпроводникового материала на основе висмута (Bi-2223). Напряжение первичной обмотки, равное 25 кВ, соответствует напряжению в контактной сети высокоскоростных железнодорожных магистралей многих стран мира. Для охлаждения обмоток используется жидкий азот. Масса трансформатора без хладагента составляет 1,7 т. Максимальная выходная мощность трансформатора, при которой возможно поддержание сверхпроводимости, — 3,5 МВ·А.

Разработки сверхпроводниковых трансформаторов проводили в Японии еще в начале 1990-х годов. Тогда был создан малогабаритный трансформатор с обмотками из сверхпроводникового провода на основе ниобия и титана (NbTi). Однако дальнейшие работы в этом направлении были приостановлены из-за больших потерь переменного тока и затруднений с использованием жидкого гелия.

В конце 1990-х был достигнут значительный прогресс в области создания сверхпроводниковых материалов на основе висмута. Благодаря этому стало возможным создание трансформатора для электроподвижного состава со сверхпроводниковыми обмотками, охлаждаемого жидким азотом.

К работам над созданием такого трансформатора приступили в 2000 г. В результате в 2003 г. был создан полномасштабный опытный образец.

## Компоновка и характеристики

Как указано выше, номинальное напряжение первичной обмотки трансформатора выбрано равным 25 кВ, что соответствует напряжению контактной сети японских высокоскоростных железнодорожных линий Синкансен. Мощность выбрана равной 4 МВ·А в соответствии с мощностью современных электропоездов, эксплуатируемых на этих линиях.

В Японии трансформаторы обычно устанавливаются под кузовами вагонов электропоездов; установка трансформаторов в кузовах применяется преимущественно на локомотивах и электропоездах из двухэтажных вагонов. Однако поскольку преобладают электропоезда из одноэтажных вагонов, в окончательном варианте конструкции применена концепция размещения трансформатора под кузовом. В то

же время разработчики предвидели, что при использовании такой компоновки на практике могут возникнуть некоторые дополнительные сложности, в связи с чем начальную стадию проектирования осуществляли исходя из варианта установки трансформатора в кузове.

## Сверхпроводниковый провод

Для снижения потерь переменного тока и повышения механической прочности была выбрана структура провода в виде многоволоконной шины с размерами поперечного сечения  $4,1 \times 0,25 \text{ мм}^2$ . Материал провода — Bi-2223. В качестве связующего применен сплав на основе серебра. Критический ток обмотки — 130 А при 77 К.

## Конструкция трансформатора

Для уменьшения потерь переменного тока была выбрана конструкция трансформатора стержневого типа.

На рис. 1 представлена конфигурация сердечника и расположение обмоток трансформатора.

Обмотки погружены в жидкий азот. Было принято решение не охлаждать сердечник, чтобы снизить тепловую нагрузку на хладагент. За счет этого значение рабочей температуры снижено с 77 до

Технические данные сверхпроводникового трансформатора	
Первичная обмотка	4 МВ·А, 25 кВ, 160 А
Вторичные обмотки	3,6 МВ·А, 1,2 кВ, $4 \times 750 \text{ А}$
Третичная обмотка	400 кВ·А, 440 В, 909 А
Полное сопротивление	Примерно 20 %

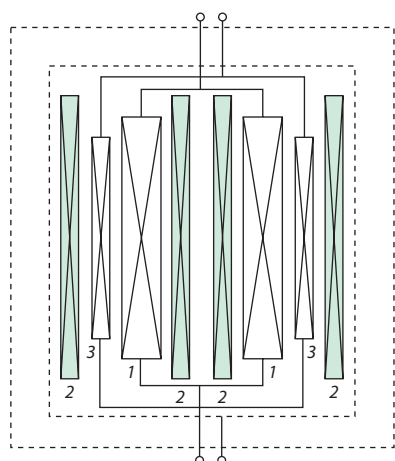


Рис. 1. Конфигурация сердечника и расположение обмоток:  
1 — первичная обмотка; 2 — вторичная обмотка; 3 — третичная обмотка

66 К, хотя такое решение привело к усложнению конструкции криостата. Снижение рабочей температуры позволило улучшить характеристики сверхпроводникового провода, предотвратить испарение жидкого азота в условиях отсутствия напряжения питания (например, ночью) и устранить, таким образом, возможность выделения газообразного азота, который может повредить электрическую изоляцию.

Анализ конструкции трансформатора выполняли для различных значений межвиткового напряжения. Трансформатор как таковой получился довольно компактным:  $1,2 \times 0,7 \times 1,9$  м. Однако даже в варианте конструкции с наименьшей массой (примерно 3 т) сверхпроводниковый трансформатор оказался

тяжелее, чем трансформатор традиционного типа. Основная причина этого — высокий уровень потерь переменного тока, который в 5–10 раз превышает теоретическое значение. Возможной причиной этого является контакт волокон провода между собой.

Был рассмотрен также вариант конструкции исходя из предположения, что уровень потерь переменного тока составит  $1/5$  его полученного значения, поскольку ожидается, что в недалеком будущем уровень этих потерь будет снижен до теоретического значения. В таком случае масса трансформатора составляет 2,4 т, включая охладитель и компрессор. При этом межвитковое напряжение равно 12,5 В.

## Изготовление трансформатора

### Сверхпроводниковый провод

В ходе выполнения общего проекта трансформатора в течение двух лет вели разработку обмоток и системы охлаждения. Затем в 2003 г. было начато изготовление трансформатора, рассчитанного на напряжение первичной обмотки 25 кВ. Однако во время изготовления трансформатора не удалось получить обмоточный провод с приведенными выше параметрами, вследствие чего пришлось приобрести у стороннего изготовителя несколько иной провод. Размеры попереч-

ного сечения этого провода равны  $(4,1 \div 4,5) \times (0,24 \div 0,27)$  мм, значение критического тока — примерно 110 А при температуре 77 К.

### Обмотки

Первичная обмотка насчитывает 2000 витков, намотанных в 16 слоев по 125 витков. В каждой вторичной обмотке использовали восемь параллельных проводов, в третичной — шесть. В обеих этих обмотках в некоторых точках провода пересекались для выравнивания индуктивности и достижения баланса токов.

### Криостат

Для того чтобы избежать потерь на вихревые токи, в конструкции криостата использован пластик, армированный стекловолокном. Криостат имеет два цилиндра, соответствующие двум стержням сердечника.

### Охладитель

Полагали, что величина потерь переменного тока превысит 6 кВт, и это означало бы, что масса всего сверхпроводникового трансформатора будет больше массы обычного трансформатора. Необходимо было уменьшить величину потерь на переменном токе до теоретического уровня, поэтому для трансформатора потребовался охладитель мощностью 1 кВт. Однако поскольку у разработчиков не было достаточно времени для создания легкого охладителя указанной мощности для подвижного состава, для проведения типовых испытаний был установлен обычный охладитель мощностью 200 Вт.

### Трансформатор в целом

Высота изготовленного сверхпроводникового трансформатора составляет 1,9 м, ширина 1,2 м, глу-

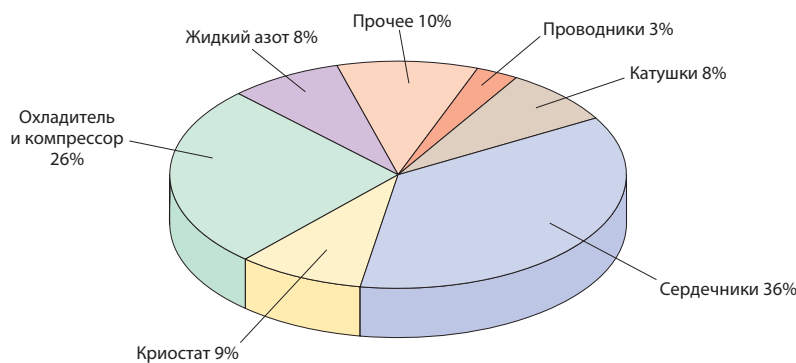


Рис. 2. Распределение массы трансформатора по элементам

бина 0,7 м (не считая компрессора), масса — 1,7 т (не считая охладителя и компрессора). Согласно расчетам суммарная масса охладителя и компрессора равна примерно 600 кг. Следовательно, общая масса трансформатора не превышает 2,3 т. Таким образом, удалось соблюсти массогабаритные параметры, заложенные в проекте.

Диаграмма распределения массы трансформатора в целом по элементам приведена на рис. 2.

### Типовые испытания

Типовые испытания сверхпроводникового трансформатора проводили в соответствии с требованиями промышленного стандарта Японии E5007 «Железнодорожный подвижной состав. Тяговые трансформаторы. Методы испытаний». Ниже приведены описание процедуры и основные результаты испытаний.

#### Испытания без нагрузки

В ходе данных испытаний были измерены потери холостого хода, составившие 0,71 кВт. Полагают, что половина этих потерь приходится на потери в стали. Величина этих потерь почти идентична величине потерь в обычном трансформаторе.

#### Испытания под нагрузкой

Обычно величину потерь под нагрузкой измеряют при коротком замыкании каждой обмотки. Такие испытания были проведены для всех обмоток, в результате чего получена зависимость потерь от тока.

Общую величину потерь невозможно получить путем сложения потерь для каждой обмотки из-за наложения друг на друга магнитных полей различных обмоток. Поэтому на данном этапе общая величина потерь при полной нагрузке (4 МВ·А) была получена путем анализа зависимости распределения маг-

нитных полей обмоток и характера потерь от результирующего магнитного поля. В результате величина потерь оказалась равной примерно 7,9 кВт при выходной мощности 4 МВ·А. Можно с уверенностью сказать, что такой метод анализа является вполне корректным, поскольку его результаты почти идентичны результатам измерений, полученным для каждой обмотки. При указанной выходной мощности ток превышал критическое значение тока для сверхпроводникового провода. К величине потерь переменного тока, равной 7,9 кВт, следует также добавить величину джоулевых (тепловых) потерь.

В результате испытаний было установлено, что максимальное значение тока, при котором поддерживается сверхпроводимость во вторичных обмотках, равно 650 А. Это значение соответствует величине выходной мощности 3,5 МВ·А. Расчетное значение потерь переменного тока при данной выходной мощности составляет 6,2 кВт.

Максимальное значение тока во вторичных обмотках при испытаниях под нагрузкой составило 750 А, что соответствует величине выходной мощности 4 МВ·А. После 30 с испытания в этом режиме пришлось прекратить, поскольку температура жидкого азота достигла 69 К. После испытаний никаких повреждений обмоток обнаружено не было.

#### Измерение полного сопротивления

На основе результатов измерений рассчитали процентное значение полного сопротивления, составившее 16,2%. Цель была в получении значения 20%. Можно предположить, что такая разница вызвана шириной провода — при проектировании предполагали, что она будет равна 4,1 мм, однако фактически максимальная ширина составляет 4,5 мм. Это означало, что высо-

та первичной обмотки становилась ближе к высоте вторичных обмоток по сравнению с исходным вариантом конструкции.

#### Диэлектрические испытания

Испытания проводили при воздействии напряжения 42 кВ переменного тока в течение 10 мин, а также импульса напряжения амплитудой 150 кВ. После испытаний никаких нарушений или повреждений изоляции обнаружено не было.

### Выводы и заключение

1. Разработан и изготовлен сверхпроводниковый трансформатор на напряжение 25 кВ с обмотками из материала на основе висмута (Bi-2223) и криостатом из армированного пластика с жидким азотом.

2. Суммарная масса трансформатора (без охладителя и компрессора) составляет 1,7 т, что почти равно проектному значению.

3. Установлено, что максимальное значение выходной мощности, при котором поддерживается состояние сверхпроводимости, составляет приблизительно 3,5 МВ·А. В ходе испытаний было достигнуто значение тока во вторичных обмотках, равное 750 А, что соответствует общей выходной мощности 4 МВ·А.

4. Расчетное значение потерь переменного тока составляет 7,9 кВт при выходной мощности 4 МВ·А и 6,2 кВт при 3,5 МВ·А. Важной задачей является уменьшение величины этих потерь.

5. Электрические испытания проведены успешно, и это свидетельствует, что с точки зрения электрической изоляции конструкция трансформатора вполне пригодна.

Создание и испытание сверхпроводникового трансформатора напряжением 25 кВ и мощностью 3,5 МВ·А для подвижного состава является важным шагом в направлении практического применения

сверхпроводниковых технологий. Развитие этих технологий делает возможным дальнейшее снижение массы и повышение эффективности трансформатора. Благодаря финансированию со стороны министерства земель, инфраструктуры и транспорта Японии исследования и разработки в этой области будут продолжены.

В настоящее время ведутся испытания нового высокоэффективного трубчатого криоохладителя для сверхпроводниковых трансформаторов, внедрение которого позволит уменьшить потери переменного тока.

Разрабатывается также инерционный накопитель энергии с маховиком и обмотками, выполненными

из сверхпроводниковых материалов. Он предназначен для сохранения кинетической энергии поезда при торможении с последующей ее выдачей в тяговый привод при пиковых нагрузках или для питания вспомогательных цепей подвижного состава. Интересной особенностью этого накопителя является применение сверхпроводниковых магнитных подшипников, в которых отсутствуют потери энергии на трение.

Еще одним примером использования сверхпроводниковых технологий является магнитный рельсовый дефектоскоп Superconducting Quantum Interference Device (SQID). С его помощью обнаруживаются так называемые белые слои под по-

верхностью катания, наличие которых свидетельствует о потенциальной опасности разрушения рельса.

В то же время основные усилия института в данной области направлены на разработку проводов нового типа для сверхпроводниковых электромагнитов, которые могли бы работать при температуре выше 50 К. Эти исследования ведутся в целях дальнейшего совершенствования оборудования инфраструктуры действующего в Японии опытного полигона для испытаний транспортной системы на магнитном подвесе.

*H. Hata et al. Quarterly Report of RTRI, 2006, № 1, p. 24–27; K. Nagashima. Superconductivity Web21, 2008, № 3, p. 1.*



**Журнал «Железные дороги мира»  
и издательство «Интекст»**



## ПОИСК И ОБОБЩЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ

**о зарубежных рынках и инновациях  
в области магистрального и промышленного  
железнодорожного, а также городского рельсового транспорта**

**для компаний,  
выходящих на внешний рынок,  
заинтересованных в инновационных решениях,  
ищущих поставщиков комплектующих.**

**Обзоры техники для железнодорожного  
и городского рельсового транспорта**

**Статистическая информация**

**Подборки статей и других материалов  
по железнодорожной тематике**

**Заинтересованные организации просим обращаться в редакцию журнала «Железные дороги мира»  
по телефону (499) 317-55-65 и электронной почте [zdm@css-rzd.ru](mailto:zdm@css-rzd.ru)**