



Том 7 выпуск 1  
декабрь 2010

## ИТСП УСТРОЙСТВА ПРОЕКТ ИТЭР В РОССИИ

### *Подготовка и кабелирование сверхпроводящих стрендов, изготовленных на Чепецком заводе (ВНИИКП)*

ИТЭР - уникальный международный проект, направленный на изучение и демонстрацию возможности использования термоядерной энергии в промышленных масштабах – является в настоящее время одним из самых крупных потребителей сверхпроводниковых материалов на основе Nb<sub>3</sub>Sn и NbTi. Российская Федерация вносит свой вклад в ИТЭР в виде кабелей, проводников, катушек полоидального и тороидального полей для магнитной системы реактора ИТЭР и других устройств.

В проекте участвуют несколько крупных научно-исследовательских институтов и организаций, одна из которых ОАО «ВНИИКП», которая отвечает за хромирование и никелирование медных и сверхпроводящих стрендов, изготовленных на Чепецком заводе по технологии ВНИИНМ, а также последующее изготовление из них кабелей и проводников для катушек магнитной системы ИТЭР. Для серийного производства сверхпроводящих кабелей полоидального поля (ПП) и тороидального поля (ТП) магнитной системы ИТЭР в ОАО «ВНИИКП» был разработан и создан технологический комплекс, включающий полный производственный цикл от исходных компонентов до готовой продукции, состоящий из:

- многоуровневого жесткого контроля исходных материалов;
- подготовки поверхности медных и сверхпроводящих стрендов;
- нанесения на стренды гальваническим методом хромового и никелевого покрытий толщиной 1,5 - 2,0 мкм с производительностью 4-5 км/час (рис. 1);
- скрутки заготовок для кабелей полоидального поля и тороидального поля;
- формирования каналобразующей спирали, скрутки заготовок для кабелей полоидального поля и тороидального поля и их обмотки нержавеющими лентами;
- процедуры заключения кабеля в нержавеющую оболочку (джекетирование) с последующей его намоткой в однослойный транспортный соленоид диаметром 4 метра. Общая протяженность линии джекетирувания составляет более 800 метров.

Созданный комплекс позволит выполнить все обязательства РФ по изготовлению кабелей для магнитной системы ИТЭР по программе 2010-2013 года.



*И далее...*

## ИТСП УСТРОЙСТВА ПРОЕКТ ИТЭР В РОССИИ

*Контроль электрофизических свойств сверхпроводников на Чепецком Механическом Заводе (НИЦ «Курчатовский Институт», Всероссийский электротехнический институт)* 3

## ИТСП ПРОВОДА И КАБЕЛИ

*ИТСП кабельная линия (ВНИИКП)* 6

## ИТСП УСТРОЙСТВА

*150 кВт Криогенная синхронная машина с постоянными магнитами и ИТСП элементами (Московский авиационный институт)* 7



Рис. 1. Линия подготовки поверхности и линия хромирования.

Конструкция кабелей для полоидальных и тороидальных катушек предусматривает пятистадийную скрутку для каждого из них по следующим схемам:

для тороидального кабеля -

$[(2SC+1Cu) \times 3 \times 5 \times (5 + \text{сердечник } 3 \times 4 \text{ Cu})] \times (6 + \text{спираль})$

для полоидального кабеля -  $3SC \times 4 \times 4 \times 5 \times (6 + \text{спираль})$

На различных стадиях скрутки кабеля применяются крутильные машины различного типа: высокоскоростные тубулярные крутильные машины используются на 1-ой и 2-ой стадиях скрутки, а также на обеих стадиях скрутки сердечника (для ТП-кабеля) (рис. 2); Крутильные машины планетарного типа используются на 3-ей, 4-ой и 5-ой стадиях скрутки кабелей с одновременным со скруткой наложением обмотки из стальных лент.



Рис. 2. Тубулярная крутильная машина и готовая скрутка.

Следующий этап - заключительная скрутка субкабеля вокруг центрального каналобразующего элемента (спирали) осуществляется с помощью планетарной крутильной машины с дополнительными устройствами. Кабель уплотняется, его «порис-

тость» уменьшается. Для сохранения качества гальванических покрытий на стрендах и минимизации их деформации, машина дополнена специально разработанным роликовым скруточным и уплотняющим калибром. Затем кабель обматывается в лентообмотчике лентой из нержавеющей стали, при этом может задаваться усилие натяжения ленты вплоть до ее разрыва. Размеры кабеля постоянно контролируются двухкоординатным лазерным измерителем и фиксируются в компьютере, затем кабель проходит тяговое устройство колесного типа и наматывается на барабан способный вмещать не менее 800 метров готовой продукции.



Рис. 3. Линия джекетирования.



Заключительная операция - джекетирование кабеля проводится в ИФВЭ (Протвино) на специально оборудованной для этого линии, состоящей из участка сварки труб и участка по затягиванию кабеля в подготовленную трубу и его компактирование с одновременным формированием транспортного соленоида (рис. 3). В результате описанных выше операций получается кабель, полностью соответствующий всем техническим условиям международного Соглашения о поставках проводников для ИТЭР (рис. 4).



Рис. 4. Готовый кабель-в-оболочке.



## Контроль электрофизических свойств сверхпроводников на Чепецком Механическом Заводе(НИЦ «Курчатовский Институт», Всероссийский электротехнический институт)

### 1. Введение

Участие Российской Федерации в международном проекте ИТЭР и организация промышленного производства на ОАО Чепецкий механический завод (г.Глазов, республика Удмуртия) сверхпроводящих проводов на основе сплава Nb-Ti и интерметаллического соединения Nb<sub>3</sub>Sn потребовало оснащения создаваемого производства измерительным комплексом, позволяющим в условиях массового производства производить аттестацию выпускаемой продукции по ее основным электрофизическим характеристикам. Требования ИТЭР на сверхпроводящий провод, предназначенный для изготовления токонесущих элементов обмоток, предусматривает проведение следующих выходных испытаний электрофизических характеристик каждой партии провода:

- Определение критического тока  $I_c$  и параметра размытости вольтамперной характеристики  $n$  сверхпроводящих стрендов;
- Определение качества стабилизирующей меди путем измерения отношения сопротивления матрицы при температуре 273К к остаточному сопротивлению, измеряемому при температурах 20К и 10К для проводов из Nb<sub>3</sub>Sn и Nb-Ti, соответственно (так называемый параметр относительного остаточного электросопротивления - RRR);
- Определение гистерезисных потерь в образцах провода в проводах с помощью вибрационного магнитометра.

В сжатые сроки специалисты РИЦ «Курчатовский Институт», ФГУП ВЭИ (НИЦ «Энергия»), ООО «Криомагнит» сумели создать работоспособный комплекс, полностью соответствующий жестким международным требованиям, и обучить сотрудников лаборатории, до этого не имевших опыта работы с криогеникой. В настоящее время лаборатория работает в многосменном режиме и все производственные операции – подготовка (отжиг и монтаж) образцов, работа с криогенными жидкостями, проведение испытаний осуществляется силами сотрудников заводской лаборатории. Количество измеренных образцов достигает нескольких сотен в месяц, что опровергает существующее мнение о какой-то особенной «сложности» или «опасности» работы с криогеникой гелиевого уровня у персонала, не имеющего многолетнего опыта работы в этой области. По всей видимости, сейчас именно в заводской лаборатории производятся самые интенсивные в России работы по технической сверхпроводимости с использованием жидкого гелия.

### 2. Стенд измерения критического тока $I_c$ и параметра размытости вольтамперной характеристики «n» промышленных проводов из Nb<sub>3</sub>Sn и Nb-Ti.

Наиболее чувствительным к технологии и одновременно самым важным для оценки применимости материала в том или ином изделии является токонесущая способность сверхпроводника, которая в простейшем случае описывается зависимостью так называемого критического тока от величины магнитной индукции и температуры. Классический метод определения критического тока заключается в измерении нелинейной вольтамперной характеристики (ВАХ) сверхпроводящего провода, помещенного во внешнее магнитное поле в испытательном криостате.

Существуют разные способы описания вольтамперных характеристик сильноточных сверхпроводников, например, в виде степенной или экспоненциальной функции транспортного тока. Поскольку в настоящее время основная масса выпускаемой на ЧМЗ продукции предназначена для использования в сверхпроводящих обмотках международного проекта ИТЭР, в первую очередь реализовано описание вольтамперной характеристики в виде степенной функции транспортного тока:

$$E = E_c (I/I_c)^n$$

где  $E_c$  – так называемое "критическое" значение продольного электрического поля в образце, соответствующее протеканию по образцу «критического» транспортного тока  $I_c$ . Значение  $E_c$  установлено равным 10<sup>-5</sup> В/м (0.1 мкВ/см). Показатель степени  $n$  характеризует размытость сверхпроводящего перехода по току и определяется из вольтамперной характеристики аппроксимацией по степенному закону участка ВАХ между точками  $E = 10^{-5}$  В/м и  $E = 10^{-4}$  В/м.

Для сопоставления характеристик ниобий-оловянных проводов, поставляемых различными производителями, научным сообществом ИТЭРа заранее оговорено, что испытания проводятся по

4-х точечной схеме на образцах, намотанных на держатель образца определенной формы (т.н. «бочонок ИТЭР», диаметром 32 мм и длиной около 35 мм со спиральной канавкой для укладки провода) из титанового сплава Ti-6Al-4V с расстоянием между потенциальными контактами 0,5м. Также заранее оговорено, при каких значениях внешнего магнитного поля следует проводить замер значений  $I_c$  и  $n$  для сверхпроводником различного типа (для целей унификации испытаний ниобий-титановые провода тестируются на тех же держателях).

При конструировании стенда для регистрации сверхпроводящего перехода, кроме требований, обусловленных свойствами самого сверхпроводника, были учтены такие соображения, как обеспечение безопасности и высокой производительности, возможность тиражирования и сопоставимость ре-

зультатов, полученных на различных установках. Стенд включает два участка с криостатами со сверхпроводящими соленоидами на 12 и 13 Тл, двух комплектов источников тока питания соленоидов и образцов, а также единого управляющего измерительного комплекса. Стенд построен по блочному принципу, что делает отдельные его части относительно независимыми и облегчает его эксплуатацию, ремонт и последующую модернизацию. Стенд включает в себя компьютерный управляющий комплекс в стандарте шасси PXI (производства National Instruments) с набором модулей сопряжения с аппаратурой стенда и высокочувствительных микровольтметров PXI NI-4071. Блок транспортного тока образцов реализован на двух стабилизированных дистанционно управляемых

источниках тока российского производства на 600 и 900А (для двух участков стенда). Блок магнитной индукции составляют два криостата со сверхпроводящими соленоидами на 12 и 13 Тл с соответствующими стабилизированными источниками тока российского производства на 300А. Определение температуры образцов осуществляется по давлению насыщенных паров гелия в криостате, для чего предназначены датчик абсолютного давления атмосферного воздуха, два датчика относительного давления насыщенных паров гелия в криостате и два измерителя уровня жидкого гелия над образцом.

Комплекс включает 10 шт. измерительных зондов для монтажа на них испытуемых образцов. На Рис 1 показаны основные элементы оборудования стенда.

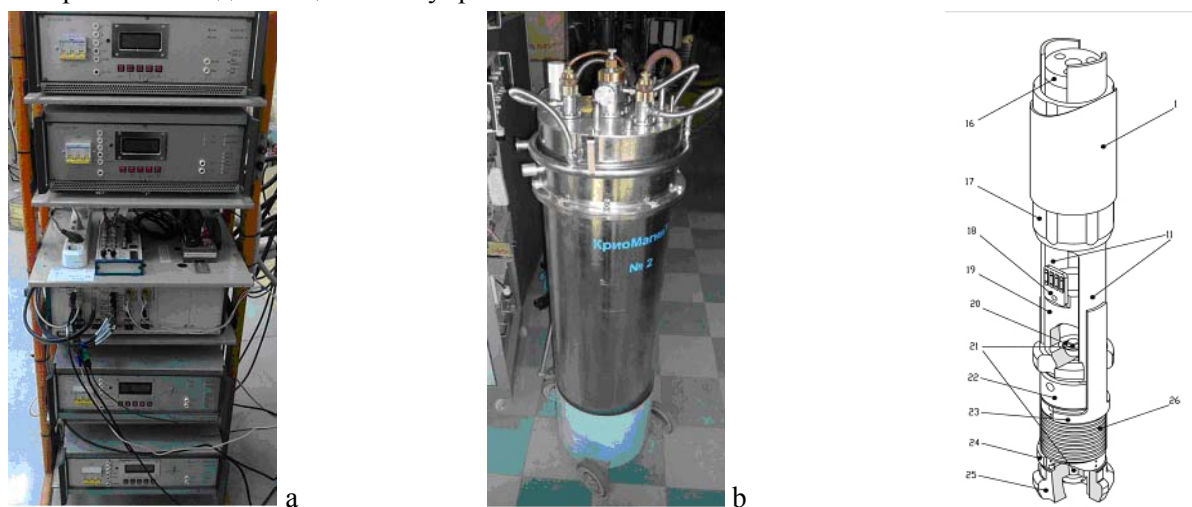


Рис. 1. Основная стойка стенда для измерения токонесущей способности (а); один из криостатов со сверхпроводящим соленоидом (б), схема нижней части измерительного зонда зонд со смонтированным образцом (с).

### 3. Стенд измерения относительного остаточного электросопротивления (RRR).

Качество меди, характеризуемое количеством химических примесей и наличием механических дефектов, играет существенную роль как в процессе производства сверхпроводников, где заготовка подвергается многократной механической обработке и отжигу, так и определяет такие важные эксплуатационные характеристики готовой продукции, как длина захода тока в сверхпроводник и устойчивость проводника с током к тепловым и электромагнитным возмущениям. Одним из чувствительных к наличию таких дефектов параметром является остаточное электросопротивление меди при криогенной температуре (выходной контроль качества медной матрицы готового провода).

В разработанном стенде измерение сопротивления производится по стандартной четырехточечной схеме, причем для простоты монтажа было принято решение отказаться от паяных контактов на образце. Все контакты прижимные, что значительно ускоряет и упрощает процесс монтажа образцов и делает его не чувствительным к типу покрытия об-

раза. Регистрируемыми параметрами являются температура образца, величина тока через образец, напряжение между двумя точками на образце, к которым прижаты потенциальные контакты (расположенные на расстоянии 100 мм друг от друга). Электросопротивление образца определяется по углу наклона ВАХ в диапазоне до 0.7 А, что исключает случайные ошибки, перегрев образца и возможное влияние термо-ЭДС на результаты измерений. Для оценки сходимости результатов измерений применяется коммутационная схема для изменения направления транспортного тока через образец. В состав стенда входит компьютерный управляющий комплекс в стандарте шасси PXI с набором модулей сопряжения с аппаратурой стенда и вольтметрами для измерения ВАХ, программируемый стабилизированный источник тока (до 20 А, с дискретностью 1 мА), температурный контроллер СтуоСоп 32В, управляющий температурным режимом в рабочей камере измерительного зонда. В комплект включены 10 измерительных низкотемпературных зондов с датчиками температуры для установки сверхпроводящих образцов и измерения их

электросопротивления в криостате и криостат жидкого гелия.

На Рис 2 показаны основные элементы оборудования стенда.



Рис. 2. Основная стойка стенда для измерения параметра RRR (а); испытательный зонд установлен в криостат (б); схема нижней части измерительного зонда с камерой стабилизации температуры (с).

#### 4. Стенд измерения гистерезисных потерь.

В процессе работы энергетического реактора типа Токамак обмотки сверхпроводящих магнитов подвергаются воздействию меняющегося во времени магнитного поля значительной амплитуды. Возникающие при этом гистерезисные потери могут вести к значительной диссипации энергии, причем выделение тепла происходит при температуре жидкого гелия. Еще более важным фактором, определяющим требования к максимальной величине гистерезисных потерь, является возможный разогрев обмоток магнитов в процессе работы реактора, что повлечет уменьшение критического тока в обмотках и, в худшем случае, может привести к переходу обмотки в нормальное состояние.

Специалистами ФГУП ВЭИ (НИЦ «Энергия») спроектирован и изготовлен стенд для измерения гистерезисных потерь, предназначенный для работы в условиях заводской лаборатории. Основой стенда являются вибрационный магнитометр для измерения намагниченности и сверхпроводящий соленоид с источником тока для циклирования магнитного поля в пределах  $\pm 3$  Тл (величина определяется требованиями ИТЭР)).

Вибрационный магнитометр является хорошо известным прибором. Он представляет собой устройство для обеспечения вибрации образца в системе приемных катушек и селективный вольтметр для измерения сигнала на катушках, пропорционального величине магнитного момента образца. Весьма высокая чувствительность вибрационного магнитометра (до  $10^{-5}$  ед) в сочетании с непревзойденной производительностью делают его наиболее распространенным прибором для измерения намагниченности в самых разных областях науки и техники.

Величина потерь  $Q$  может быть определена из численного расчета площади установившейся петли намагничивания  $M(H)$  единицы объема образца в заданном интервале изменения внешнего магнитного поля  $H$ . Хотя такой способ определения потерь является хорошо отработанным и стандартизован ИЕС, его конкретная реализация в условиях промышленного предприятия и (возможно) круглосуточной работы потребовала применения ряда дополнительных устройств и доработки существовавших физических и технических решений:

- При конструировании магнитной системы вибратора применена специально спроектированная система постоянных магнитов с однородным радиальным полем в кольцевом зазоре более 1 Тл, что позволяет увеличить амплитуду (или частоту) вибрации и повысить чувствительность магнитометра.
- Рассчитана и изготовлена система приемных катушек (градиометр первого порядка) с зоной однородной (0,5%) чувствительности протяженностью около 1 см; это позволяет снизить требования к точности позиционирования образца на держателе.
- Для загрузки штоков (держателей образца) в криостат применена система шлюзования с телескопическим шлюзовым устройством и вакуумным затвором. Промывка шлюза газообразным гелием обеспечивается специализированным контроллером. Такая процедура загрузки образцов позволила свести к минимуму загрязнение криостата частицами затвердевших газов из воздуха.
- Все действия операторов и рабочие параметры стенда протоколируются программным обеспечением стенда, что позволяет оперативно выявлять недостатки работы как самого стенда, так и ошибки



обслуживающего персонала при эксплуатации стенда.

Стенд позволяет проводить измерения до 4 образцов в час. Аналогичный стенд в настоящее время эксплуатируется непосредственно во ФГУП ВЭИ.

Описанные стенды работают в лаборатории ЧМЗ уже более двух лет, полностью аттестованы и сертифицированы, серьезных проблем в работе за это время зафиксировано не было. Количество измеренных паспортизованных образцов к настоящему времени превысило несколько тысяч.

*С.В.Шавкин, А.В.Калинов*

## ВТСП ПРОВОДА И КАБЕЛИ

### ВТСП кабельная линия (ВНИИКП)

Многообещающие перспективы практического применения высокотемпературной сверхпроводимости дали жизнь множеству интереснейших проектов, в том числе и в России. Один из них, призванный перевести силовую электроэнергетику на рельсы сверхпроводимости, - ВТСП кабельная линия длиной 200 метров. Год назад линия была собрана и испытана в условиях максимально приближенным к реальным. Начало этому проекту было положено в 2005 году. Началось все с изготовления и испытаний во «ВНИИКП» небольшого по длине 5-метрового ВТСП кабеля. Из возможных к применению ВТСП лент отбирались самые технологичные. Прорабатывалась конструкция, готовился испытательный стенд для тестирования кабеля, разрабатывались методики испытаний, отрабатывались технологии производства как самого кабеля, так и его сопряжений с внешними устройствами.

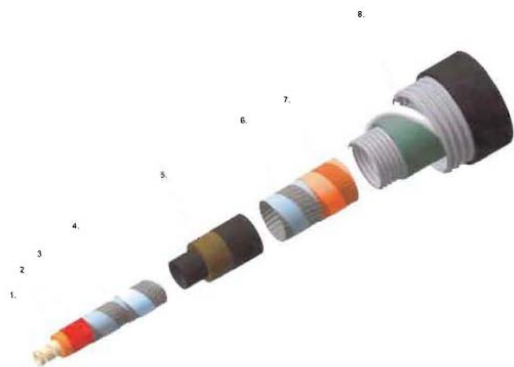


Рис. 1. Сверхпроводящий силовой кабель. (1, 2, 3- формер; 4- повиты ВТСП лент; 5- изоляция; 6- сверхпроводящий экран; 7- защитный медный экран; 8- гибкий криостат)

Следующим этапом проекта стал 30 метровый образец ВТСП кабеля. Три отрезка ВТСП кабеля длиной по 30 метров, каждый в своем гибком криостате, у каждого на конце находилась криогенная тоководная муфта. Для испытаний данной системы в Москве в НТЦ «Электроэнергетики» был создан испытательный стенд, позволяющий проводить испытания протяженных образцов ВТСП кабельных линий под нагрузкой. В работу над проектом вклю-

чаются новые организации, расширяется и география проекта. Так для наложения высоковольтной изоляции и медного экрана кабель был доставлен в город Пермь на завод «Камкабель». Следует заметить, что 30-метровый ВТСП кабель изготавливался полностью в заводских условиях с использованием промышленных технологий, а все его элементы являются прототипами устройств для работы в реальных электросетях. Успешные испытания 30-метровой кабельной линии позволили перейти к следующему этапу – созданию высокотемпературной сверхпроводящей (ВТСП) кабельной линии длиной 200 м (рис. 1). Кабельная линия создавалась не как экспериментальный образец, а была адаптирована к реальной сети, разработана с учетом расположения в существующих кабельных коллекторах и была полностью готова к промышленной эксплуатации. После проведения дополнительных комплексных испытаний, предполагается установить кабельную линию на подстанции «Динамо» в Москве для опытной эксплуатации в 2011–2012 гг.

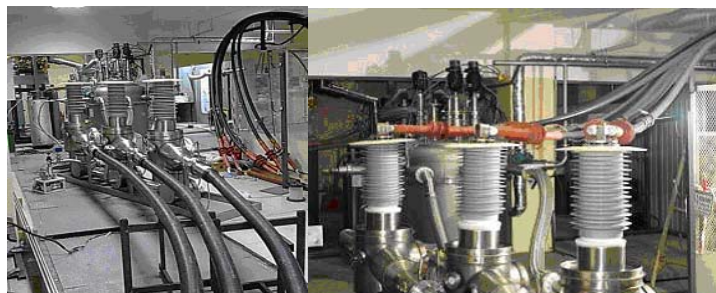


Рис. 2. Кабельная линия подсоединенная к электрической и криогенной системам полигона.

Ошибочно представлять ВТСП кабельную линию только как протяженный отрезок кабеля в криостате. Это сложная система, включающая криогенную установку, криогенные токовые муфты, системы управления и криообеспечения. Каждый из элементов этой системы – сложное наукоемкое устройство, создавать которые приходилось практически впервые, не опираясь на предшествующий опыт, часто не имея достаточных данных для анализа и возможности для эксперимента. В данной системе тесно переплелись такие отрасли как кабельная техника, криогеника, вакуумная техника, электротехника, диктующие часто противоречивые требования к элементам системы. Создание нетрадиционных видов электротехнического оборудования потребовало выполнения большого комплекса сопутствующих исследований и проведения большого объема электромагнитных, механических, теплофизических и гидродинамических расчетов с их экспериментальной верификацией на макетах и моделях. Успешно проведенные испытания показали правильность принятых решений и готовность ВТСП линии к промышленной эксплуатации.

На данный момент ВТСП кабельная линия находится на полигоне НТЦ «Электроэнергетики» (рис. 2) и проходит дополнительную серию испытаний, таких как испытания при перегрузке, ресурсные испытания, работа в несимметричных режимах и т.п. Для проведения испытаний кабеля током короткого замыкания создан специальный криостат, в котором был расположен 5-метровый образец - свидетель ВТСП кабельной линии. При проведении испытаний удалось достичь тока с максимальной амплитудой в 44 кА и определить термическую и механическую прочность сверхпроводящего кабеля (Рис. 3).

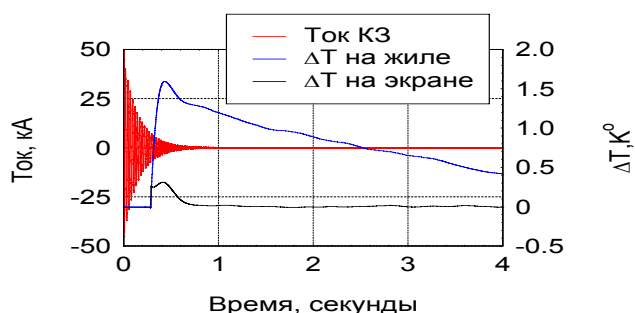


Рис. 3. При испытании током к.з. с максимальной амплитудой 44 кА перегрев не превысил 1,7 К.

В результате проведенных испытаний было подтверждено соответствие всех параметров кабельной линии, значениям, заданным в техническом задании на работу. Сверхпроводящая кабельная линия на основе высокотемпературных сверхпроводников успешно выдержала испытания и готова к установке для опытной эксплуатации в энергосеть г. Москвы.

Созданный опытный образец силовой ВТСП кабельной линии является по своим параметрам (длина и передаваемая мощность) крупнейшим силовым сверхпроводящим кабелем в Европе и третьим-четвертым в мире.

В результате выполнения НИОКР по разработкам силовых сверхпроводящих кабелей на основе высокотемпературных сверхпроводников Россия вышла на передовые позиции в мире. Накоплен многогранный опыт, создан и отработан ряд передовых технологий по изготовлению сверхпроводящих кабельных линий и сопутствующих криогенных устройств.

*А.А. Носов*

## ВТСП УСТРОЙСТВА

### *150 кВт Криогенная синхронная машина с постоянными магнитами и ВТСП элементами (Московский авиационный институт)*

К новому направлению развития синхронных двигателей (СД) с постоянными магнитами (ПМ) относятся криогенные двигатели с охлаждением жидким азотом или водородом и массивными или пленочными ВТСП элементами в роторе. По предварительным оценкам массоэнергетические показатели таких криогенных синхронных ВТСП двигателей могут быть заметно выше по сравнению с двигателями традиционного исполнения при тех же режимах охлаждения. Массивные ВТСП элементы в таких двигателях могут использоваться как высокоэнергетические криомагниты, а также как диамагнитные элементы композитного ротора с ПМ из редкоземельных магнитов (РЗМ).

Можно выделить следующие три перспективные конструктивные схемы роторов магнитоэлектрических ВТСП двигателей – с радиальной, радиально-тангенциальной и тангенциальной намагниченностью (рис.1, а, б, в). Каждая из них имеет свои особенности, преимущества и недостатки, в связи с чем проблема выбора конкретной схемы при проектировании машины становится весьма актуальной. На основе решения двухмерных электродинамических задач был проведен сравнительный анализ распределений магнитных полей в активной зоне таких ВТСП электрических машин и их энергетических характеристик. В результате этого анализа были определены области рационального использования для каждой конструкции (рис. 2). Так двигатели с радиальными постоянными магнитами эффективны в широком диапазоне полюсности при относительно тонких ПМ (рис.2 а). Использование двигателей с радиально-тангенциальными магнитами предпочтительно при среднем числе пар полюсов –  $p = 2-4$  при относительно толстом слое ПМ (рис.2 б). Двигатели с тангенциальными магнитами имеют преимущество при большом числе пар полюсов –  $p > 5$  и относительно толстом слое магнитов (рис.2 в). На графиках (рис.2 а, б, в) показана зависимость пиковой мощности двигателя от числа пар полюсов  $p$  при различной относительной толщине магнитов в роторе  $\Delta = (r_2 - r_1) / r_2$  ( $r_1$  и  $r_2$  – внутренний и внешний радиусы ПМ). В результате этих исследований для экспериментальной высокооборотной ВТСП машины был выбран вариант конструктивной схемы с радиально-тангенциальными постоянными магнитами.

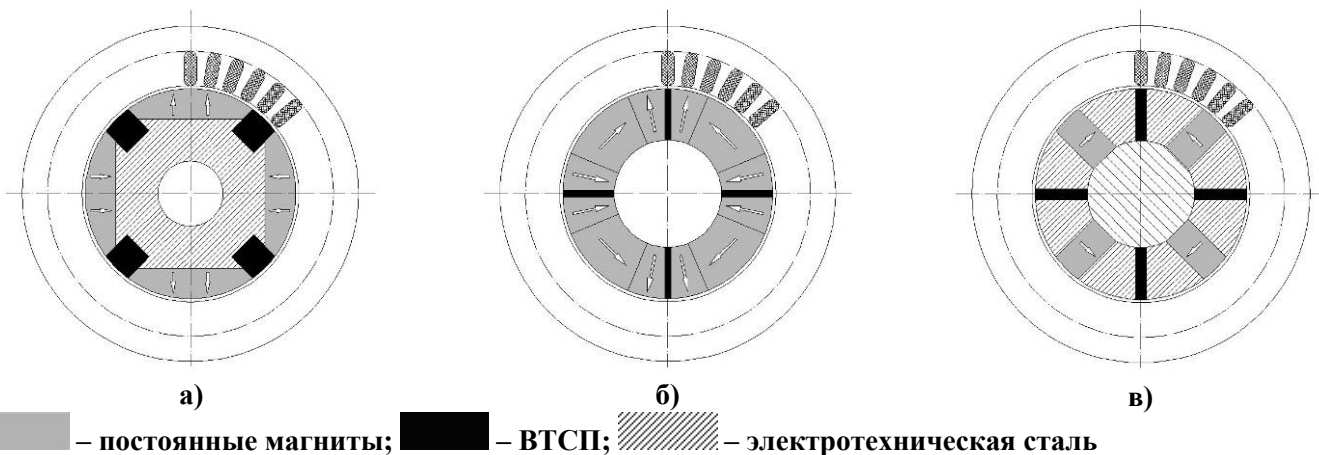
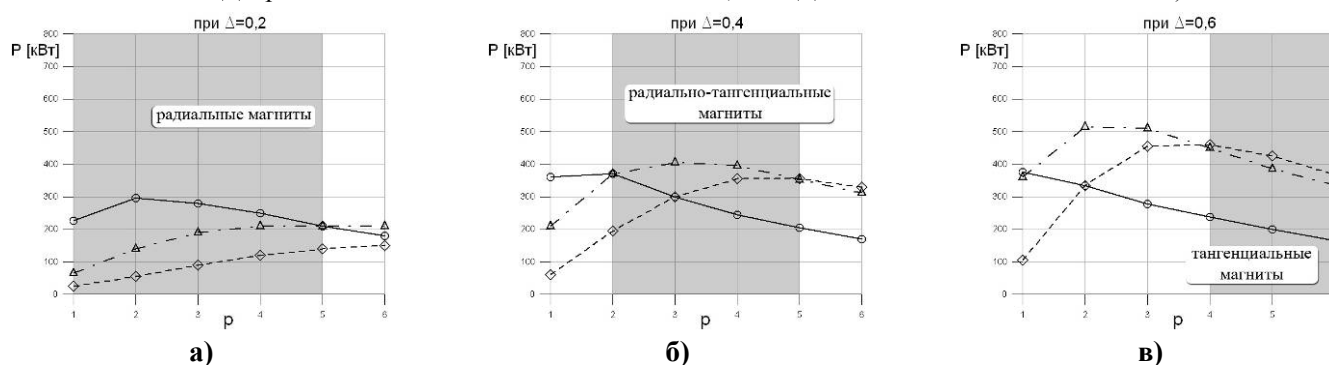


Рис. 1 – Основные конструктивные схемы СД с ПМ и ВТСП (а – СД с радиальными магнитами; б – СД с радиально-тангенциальными магнитами; в – СД с тангенциальными магнитами)



○—○ – СД с радиальными ПМ; △---△ – СД с радиально-тангенциальными ПМ; ◇---◇ – СД с тангенциальными ПМ;

Рис. 2 – Результаты сопоставления СД по пиковой мощности при различной относительной толщине магнитов  $\Delta$  (а – при  $\Delta=0,2$ ; б – при  $\Delta=0,4$ ; в – при  $\Delta=0,6$ )

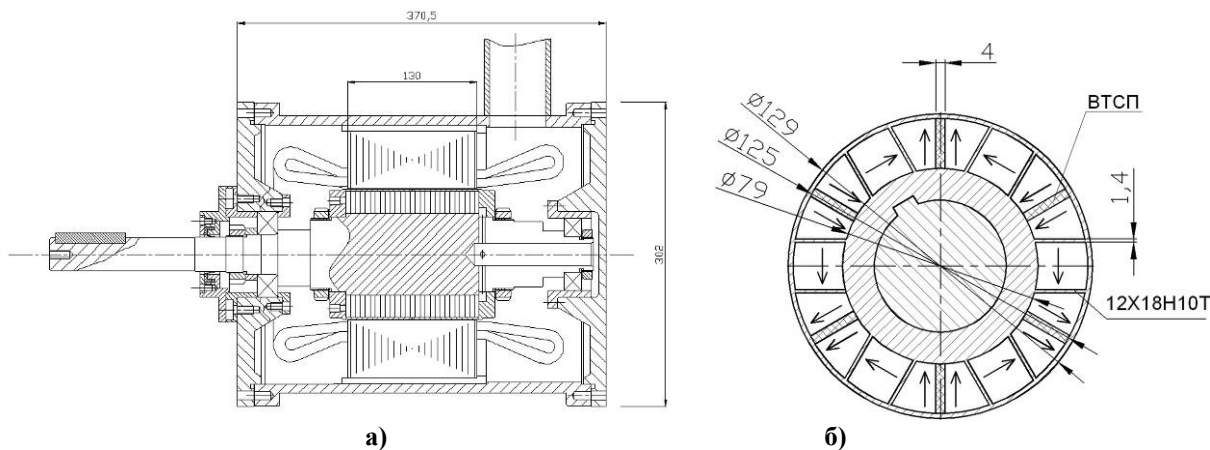


Рис. 3 – Конструкция ВТСП двигателя

В МАИ совместно с ВНИИЭМ (г. Истра) был спроектирован и изготовлен 150 кВт криогенный синхронный двигатель (ДС-150) с радиально-тангенциальными постоянными магнитами и ВТСП пластинами из иттриевой керамики в роторе. В соответствии с результатами теоретических исследований была выбрана оптимальная конструкция ротора СД с числом пар полюсов  $p = 3$  и габаритными размерами ( $D \times L = 130 \times 130$  мм).

Конструкция криогенного синхронного ВТСП электродвигателя ДС-150. Общий вид конструкции проектируемого ВТСП электродвигателя показан на рис. 3а. ВТСП двигатель представляет собой бесконтактную синхронную машину с общим криостатом и ротором, содержащим постоянные магниты и пластины из ВТСП керамики. Поперечное сечение ротора показано на рис. 3б, где стрелками обозначено направление намагниченности постоянных магнитов.



Фото ВТСП двигателя ДС-150 показано на рис. 4, а, фото ротора – на рис. 4, б, в. Охлаждение статора и ротора двигателя осуществляется жидким азотом ( $T=77\text{ K}$ ). Вход жидкого азота осуществляется через

штуцер, расположенный в подшипниковом щите. Выброс паров азота производится через трубу на корпусе и систему гофрированных труб в атмосферу.



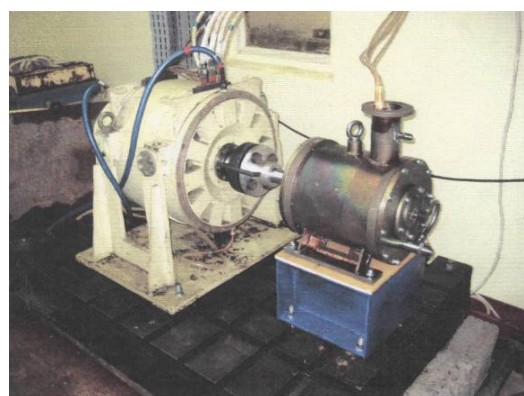
а



б



в



г

Рис. 4 – Двигатель ДС-150 (а – фото двигателя; б – вал ротора с напрессованным пакетом до установки магнитов; в – ротор с установленными постоянными магнитами и ВТСП пластинами; г – двигатель ДС-150 во время испытаний)

Ротор двигателя состоит из шихтованного пакета, набранного из листов нержавеющей стали 12Х18Н10Т толщиной 1 мм, склеенных компаундом ЭКД-14. Пакет ротора напрессован на вал из стали 12Х18Н10Т. Пакет ротора имеет 12 вырезанных лазером пазов, для постоянных магнитов и ВТСП керамики (рис. 4, б). В пазы шихтованного пакета ротора установлены постоянные магниты НПМ-38. В шести пазах прямоугольной формы установлено по одному тангенциальному магниту, в других шести пазах – по два радиальных магнита, разделенных ВТСП пластиной из иттриевой керамики (рис. 4, в). На рис. 4, г показан двигатель ДС-150 и нагрузочная машина.

На основе анализа критических параметров, токонесущей способности и механических свойств современных ВТСП элементов было показано, что при охлаждении жидким азотом ( $T = 77\text{ K}$ ) наилучшими параметрами обладают объемные ВТСП элементы на основе иттриевой керамики  $YBCO$ . В этой связи были изготовлены объемные блоки из ВТСП керамики  $YBCO$  для ротора экспериментального электродвигателя с ПМ.

Основные проектные параметры макетного образца криогенной электрической машины с ВТСП и ПМ в роторе приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Проектные параметры ВТСП двигателя ДС-150

Мощность, кВт	150
Напряжение питания фазное/линейное, В	220/348
Частота тока, Гц	300
Номинальный ток, А	240
Номинальная плотность тока, $\text{A}/\text{мм}^2$	20
Частота вращения, $\text{мин}^{-1}$	6000

Были проведены экспериментальные исследования ВТСП синхронной машины в генераторном и двигательном режимах работы.

В генераторном режиме работы ВТСП электрической синхронной машины ДС-150 определялись следующие характеристики:

- Характеристики холостого хода (зависимость напряжения ДС-150 от частоты вращения ротора).

- Внешняя характеристика ДС-150 при номинальной частоте вращения  $6000\text{ мин}^{-1}$  и пониженной –  $3000\text{ мин}^{-1}$ .

На рис. 5а показана характеристика холостого хода ДС-150. Видно, что при повышении частоты от

нуля до 300 Гц линейно возрастает значение фазного напряжения от нуля до величины  $\sim 200$  В. На рис. 5б представлена внешняя характеристика ДС-150 в генераторном режиме. Испытания проводились при частоте  $f=150$  Гц и  $f=300$  Гц. Из графика видно, что при числе оборотов  $6000 \text{ мин}^{-1}$

( $f=300$  Гц) и  $3000 \text{ мин}^{-1}$  ( $f=150$  Гц) при повышении нагрузки происходит плавное падение фазного напряжения практически по линейному закону. Результаты испытаний ДС-150 в двигательных режимах показаны на рис. 6а, б.

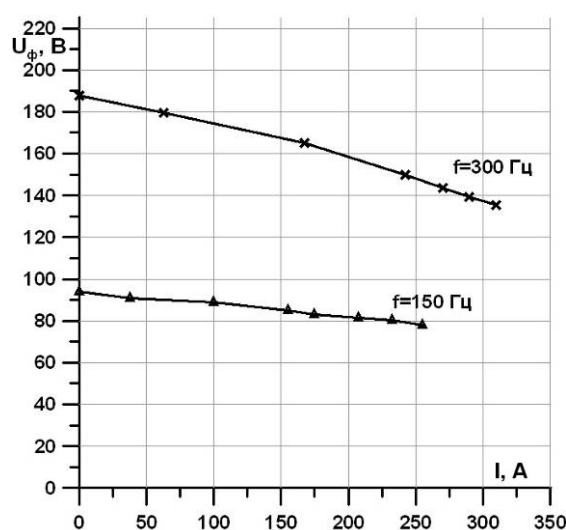
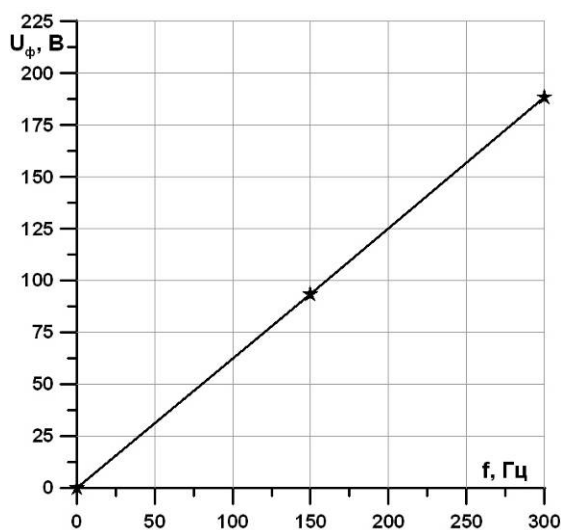


Рис. 5 – Экспериментальные характеристики ВТСП машины ДС-150 в генераторном режиме (а – характеристика холостого хода; б – внешняя характеристика)

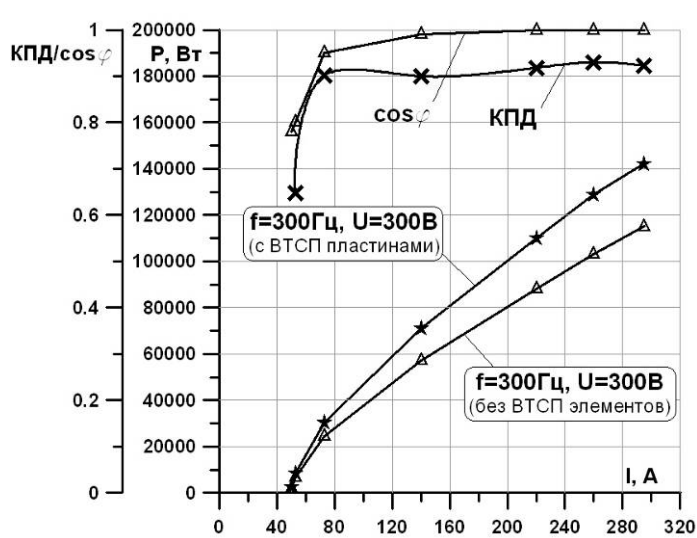
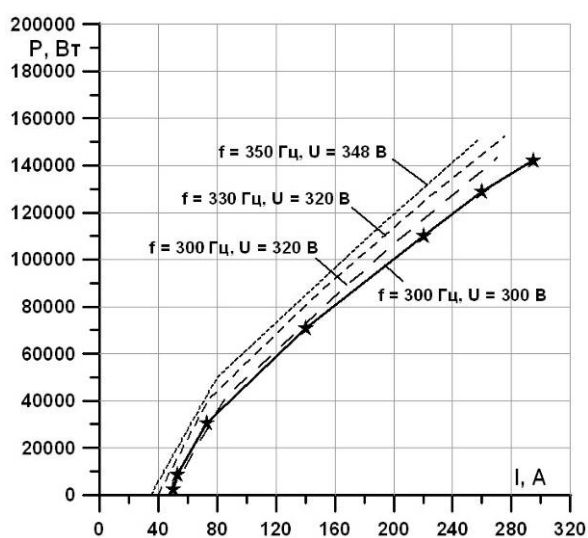


Рис. 6 – Экспериментальные характеристики ВТСП машины ДС-150 в двигательном режиме (а – мощностные характеристики при различных частотах и амплитудах питающего напряжения; б – нагрузочные характеристики при номинальной частоте и амплитуде питающего напряжения)

Сопоставительные характеристики при различной частоте вращения и амплитуде питающего напряжения в двигательном режиме работы показаны на рис. 6, а б. При всех исследованных режимах значение величины  $\cos \varphi$  при мощности близкой к номинальной (150 кВт) близко к единице.

С целью определения эффективности применения массивных ВТСП элементов в роторе двигателя ДС-150 с радиально-тангенциальными магнитами были проведены испытания при криогенных температурах выше критических для ВТСП керамики

( $T \geq 120 \text{ K}$ ). Испытания проводились при кратковременном отключении подачи жидкого азота и фиксированной нагрузки на валу. Сопоставление измерений мощности при частично отогретом роторе машины, когда иттриевая керамика теряет свои сверхпроводящие свойства с мощностью ВТСП двигателя в номинальном режиме (при  $T = 77 \text{ K}$ ) показало, что применение в составе ротора массивных ВТСП элементов позволяет увеличить мощность на 20% (рис. 6, б).

Расчётная пиковая мощность спроектированного СД составила 400 кВт, при этом плотность тока в обмотке якоря достигает значения 70 А/мм<sup>2</sup>. Таким образом, запас по перегрузочной способности составляет 2,6.

*Заключение и выводы:*

1. Экспериментальные исследования 150 кВт синхронной ВТСП машины с радиально-тангенциальными магнитами и массивными ВТСП элементами в роторе показало, что такие ВТСП электрические машины обладают высокими массо-

энергетическими показателями по сравнению с обычными машинами с постоянными магнитами при одинаковых режимах охлаждения на уровне жидкого азота (77 К).

2. ВТСП синхронные машины могут найти практическое применение в перспективных разработках аэрокосмической техники и системах криостатирования в качестве приводов высокоэффективных крионасосов.

*К.Л.Ковалёв*

**Издатель НИЦ «Курчатовский Институт», НБИК, НТК «Прикладная сверхпроводимость»**

Научный редактор: *В.С. Круглов*, зам. директора НТК сверхпроводимость

Редакторы: директор научного направления ОАО «ВНИИКП» *В.С. Высоцкий* [vysotsky@gmail.com](mailto:vysotsky@gmail.com),

*В.И. Щербаков* [sherby@issph.kiae.ru](mailto:sherby@issph.kiae.ru)

В подготовке выпуска принимали участие: *К.А.Шутов*, *С.В.Шавкин*, *А.В.Калинов*,  
*А.А.Носов*, *К.Л.Ковалёв*, *А.К. Чернышева* [perst@issph.kiae.ru](mailto:perst@issph.kiae.ru),

Верстка: *И.Л. Фурлетова*