

Разработка сверхпроводящего провода для центрального соленоида токамака с реакторными технологиями (ТРТ)

СЫТНИКОВ В.Е.¹, ЛЕЛЕХОВ С.А.², ЗУБКО В.В.^{3,1}

¹НТЦ ФСК ЕЭС, Москва, Россия

²ИТЭР–Центр, Москва, Россия

³ВНИИКП, Москва, Россия

В статье представлены результаты предварительной разработки сверхпроводящего провода на основе конструкции типа VS и параллельных пакетов лент для центрального соленоида компактного термоядерного реактора ТРТ. Одной из основных проблем, которые необходимо решить для успешной реализации таких проектов, является создание высокоточных высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) проводников для тороидальных катушек возбуждения и секций центрального соленоида. Компактность магнитной системы требует создания проводника с высокой инженерной плотностью тока до 90 А/мм². При этом рабочий ток в обмотках должен быть на уровне 60 кА при 15 К в магнитном поле 15 Тл. В центральном соленоиде провод подвергается значительным механическим нагрузкам, вызванным силами Лоренца. Значительная запасенная энергия в магните требует наличия в проводнике элементов, обеспечивающих аварийный вывод энергии при приемлемом напряжении и нагреве обмотки, которые не приводят к повреждению ее элементов. В конструкции проводника должно быть достаточно места для размещения стабилизирующих и упрочняющих материалов, а также для каналов охлаждения. Рассмотрены два конструктивных варианта проводника типа VS на основе радиально расположенных ВТСП-лент второго поколения и на основе параллельных пакетов. Проведен анализ расчетных характеристик предлагаемых проводников при различных режимах работы электромагнитной системы токамака ТРТ. Представлены результаты расчетов методом конечных элементов распределения магнитного поля в проводнике, его токопроводящей способности и оценки потерь энергии в изменяющемся магнитном поле.

Ключевые слова: центральный соленоид, конструкция провода, рабочий ток, ВТСП-2-ленты

Термоядерная энергия – это фундаментальный шаг на пути к экологически чистому источнику энергии, не содержащему парниковых газов. Термоядерный синтез безопасен, имеет неограниченный источник топлива, высокую плотность мощности и не приводит к значительным радиационным загрязнениям. В последние годы во всем мире наблюдается большой интерес к проектированию относительно компактных установок с высоким магнитным полем [1, 2], достигающим 7–12 Тл на оси плазмы. В этом случае максимальное поле на катушках будет находиться в пределах 14–21 Тл. Современные ВТСП-2-материалы рассматриваются как ключевой элемент таких установок, поскольку они позволяют увеличить магнитную индукцию в рабочем объеме, уменьшить габариты и снизить стоимость. Значительный прогресс, достигнутый за последние годы в области совершенствования ВТСП-2-материалов, дает возможность спроектировать квазистационарный токамак с реакторными технологиями (ТРТ) с высоким магнитным полем на оси плазмы [3]. Высокое магнитное поле позволяет достичь зажигания плазмы токамака при существенно умень-

шенных размерах машины ($R = 2,15$ м, $a = 0,57$ м) и, соответственно, стоимости. Создание сильного магнитного поля в ограниченном пространстве установок типа токамак с заданным аспектным соотношением $R/a \approx 3,77$ приводит к значительному увеличению инженерной плотности тока в катушках тороидального поля и секциях центрального соленоида. Общий вид электромагнитной системы (ЭМС) ТРТ показан на рис. 1. ЭМС включает в себя 16 катушек тороидального поля, 6 катушек полоидального поля и 4 секции центрального соленоида. Все катушки предполагается изготавливать из проводов на основе ВТСП-2-лент.

Для намотки секций будет использоваться ВТСП-провод типа "кабель в оболочке". В качестве основного материала была выбрана ВТСП-2-лента шириной 4 мм с токонесущей способностью в несколько сотен ампер. Таким образом, проблема возникает из-за объединения большого количества ВТСП-2-лент в единую токопроводящую систему. В то же время необходимо добиться равномерного распределения тока между всеми лентами, что является нетривиальной задачей: омическое сопротивление ВТСП-лент в рабочем режиме равно

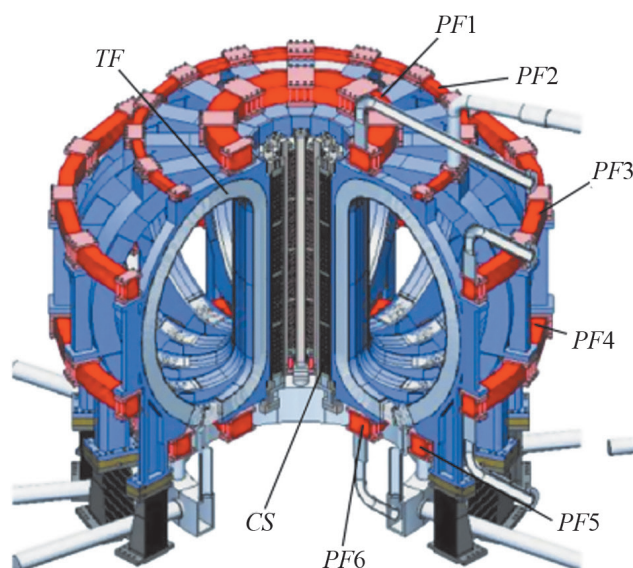


Рис. 1. Общий вид электромагнитной системы реактора ТРТ: CS – центральный соленоид; TF – катушка тороидального поля; PF1–PF6 – катушки полоидального поля

Fig. 1. General view of the electromagnetic system of the TRT reactor: CS – central solenoid; TF – toroidal field coil; PF1–PF6 – poloidal field coils

нулю. В дополнение к ВТСП-лентам в конструкцию проводника в необходимом количестве должны быть включены армирующие и стабилизирующие материалы, а также каналы для прокачки хладагента.

Следует отметить, что центральный соленоид является наиболее напряженным элементом ЭМС ТРТ с точки зрения максимальной рабочей температуры, индукции магнитного поля и механических напряжений. Именно поэтому разработка ВТСП-проводника для центрального соленоида (CS) ТРТ является одной из важнейших задач проекта.

Требования, предъявляемые к обмоточному проводу крупных магнитов. В качестве основы для разработки конструкции и последующего анализа проводов используются расчетные условия эксплуатации катушек ЭМС ТРТ, изложенные в [4]. Центральный соленоид действует как индуктор для зажигания плазмы, состоит из четырех секций, каждая из которых подключена к отдельному источнику тока.

Отметим ряд конструктивных особенностей катушек больших ЭМС.

По ряду причин оптимальным решением для намоточного провода является многоэлементная транспонированная структура с высоким током (30–100 кА).

Катушки ТРТ испытывают высокие механические нагрузки, и для того чтобы выдерживать их, около 70% поперечного сечения катушки занимает конструкционный материал (сталь, бронза).

В конструкцию должны быть включены охлаждающие каналы и стабилизирующий материал.

В ряде случаев электромагнитные силы, генерируе-

мые током в проводе, создают серьезную проблему для самого провода, вызывая ухудшение его токонесущей способности.

Основные технические требования, предъявляемые к проводу центрального соленоида. Сформулируем основные технические требования к проводам CS на основе результатов предварительного проектирования электромагнитной системы [4].

Конструктивное исполнение: проводник типа «кабель в оболочке».

Сверхпроводящие элементы помещаются в силовую теплопроводящую конструкцию и заключаются в герметичную стальную оболочку.

Диапазон изменения индукции магнитного поля в катушке составляет 0–14 Тл.

Провод охлаждается косвенно потоком охлаждающего агента, прокачиваемого через отверстия в конструкции.

Диапазон рабочих температур CS составляет 5,0–20 К.

Рабочая линейная плотность тока по ленточному ВТСП-проводнику CS составляет 60 А/мм ширины.

Максимальный рабочий ток провода CS составляет 60 кА.

Техническая плотность тока провода CS без изоляции должна быть не менее 89 А/мм².

Запас по току как отношение критического тока к рабочему току при изменении температуры от 5,0 до 20 К должен варьироваться от 2,0 (при 5,0 К) до 1,2 (при 20 К) и уточняется при оптимизации проводника.

Желательно получить максимально равномерное распределение тока между ВТСП-лентами, что обеспечивает минимальный расход сверхпроводящих материалов.

Проводник и катушка CS должны выдерживать не менее 20000 рабочих циклов.

Допустимый радиус изгиба провода должен позволять изготавливать катушки CS без значительного снижения токонесущей способности используемых ВТСП-лент. Количество ВТСП-лент, элементов и поперечного сечения канала, а также характеристики материалов, используемых в конструкции провода, являются предметом оптимизации, которая должна быть выполнена на основе результатов расчетов и экспериментальных исследований образцов элементов и проводов.

Основные характеристики ВТСП-2-лент. В расчетах за основу принята ВТСП-2-лента, изготовленная компанией SuperOx [5, 6]. Лента изготавливается на подложке hastelloy C276 толщиной 40, 60 или 100 мкм. Стандартная ширина лент варьируется от 4 до 12 мм. По специальному заказу может быть изготовлена лента на подложке толщиной 30 мкм и любой шириной, но не более 12 мм. Верхний слой может быть изготовлен из серебра, меди, припоя или изоляционного материала. Критический ток ВТСП-лент в поперечном поле при температуре 4,2 и 20 К, измеренный в различных лабораториях, указан в [7], а на рис. 2 приведены ре-

зультаты измерений, выполненных непосредственно в *SuperOx*. Толщина ленты, покрытой слоем меди 5–6 мкм и подложкой 40 мкм, составляет 56 мкм, для подложки 60 мкм – 76 мкм, а для подложки 100 мкм – 116 мкм.

В зависимости от толщины ленты конструктивная плотность тока может достигать 1000 А/мм² в поперечном поле 20 Тл [7].

На основе данных для лент шириной 4 мм, показанных на рис. 2, среднее расчетное значение критического тока лент компании *SuperOx* для проводов ТРТ можно принять:

$I_c(14 \text{ Тл}, 4,2 \text{ К}) = 600 \text{ А}$ – не менее 150 А/мм ширины.

$I_c(14 \text{ Тл}, 20 \text{ К}) = 320 \text{ А}$ – не менее 80 А/мм ширины.

ВТСП-ленты характеризуются высоким уровнем потерь энергии при работе в изменяющемся магнитном поле, особенно когда оно ориентировано перпендикулярно плоскости лент. Для уменьшения тепловыделения, связанного с гистерезисными потерями в сверхпроводящем слое лент, может быть предусмотрена возможность филаментации лент, т.е. разделения сверхпроводящего слоя на несколько тонких параллельных полос на общей подложке [8, 9]. Однако этот вопрос требует дополнительного изучения с точки зрения технологичности и эффективности процесса филаментации. С другой стороны, для уменьшения кооперативных потерь энергии в ВТСП-проводе могут быть использованы конструктивные решения, приводящие к увеличению поперечного сопротивления и, соответственно, снижению потерь энергии в проводе.

Основные направления разработки ВТСП-проводов для магнитов термоядерных установок. Разработка проводов для компактных магнитных

систем, генерирующих сильные магнитные поля, очень актуальна [10, 11]. Чаще всего рассматриваются проводники на основе ВТСП-2-лент, что позволяет повысить рабочую температуру по сравнению с магнитами, изготовленными из низкотемпературных проводников. Кроме того, критические магнитные поля ВТСП-материалов значительно выше, чем в низкотемпературных сверхпроводниках. Рабочие токи в таких магнитах составляют десятки кА в магнитных полях с индукцией 12–20 Тл и температурой 5–20 К. В магнитах провод подвергается воздействию значительных механических нагрузок, вызванных силами Лоренца. Кроме того, большая запасенная энергия в больших магнитах требует наличия в обмотке элементов, обеспечивающих аварийный выход энергии при приемлемом напряжении и нагреве обмотки. Таким образом, в сверхпроводящем сильноточном проводе типа "кабель в оболочке", помимо самого сверхпроводника, должны быть армирующие элементы, стабилизирующий металл (обычно медь или алюминий), электрическая изоляция и каналы для прокачки охлаждающего агента. Площадь этих элементов в поперечном сечении проводника определяется для каждого конкретного проекта. Как правило, практически во всех проектах планируется использовать ленты шириной 2–4 мм и толщиной 30–100 мкм. По конструкции проводники можно разделить на две основные группы, показанные на рис. 4.

Наибольшее количество разработок посвящено проводам, изготовленным из предварительно собранных стопок лент – *Stacked-Tape Conductor*. Токопроводящая часть провода собирается в два этапа. Первичным элементом в таких проводах является стопка лент, которые либо расположены в плоскости [12, 13] (рис. 3,а), либо скручены вдоль продольной оси

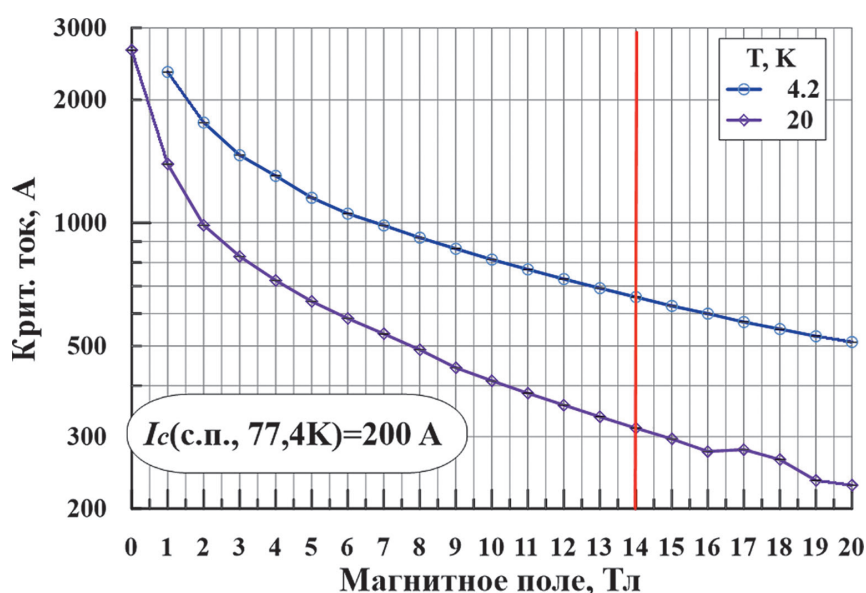


Рис. 2. Зависимости критического тока от магнитного поля для ВТСП-ленты шириной 4 мм, измеренные в *SuperOx*

Fig. 2. Dependences of the critical current on the magnetic field for HTSP-2-tape 4 mm wide, measured in *SuperOx*

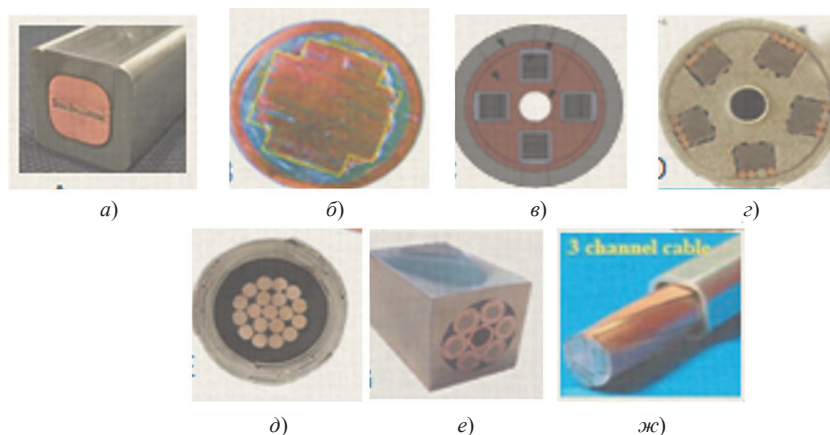


Рис. 3. Поперечные сечения различных ВТСП-проводов для крупных магнитов

Fig. 3. Cross sections of various HTSP wires for large magnets

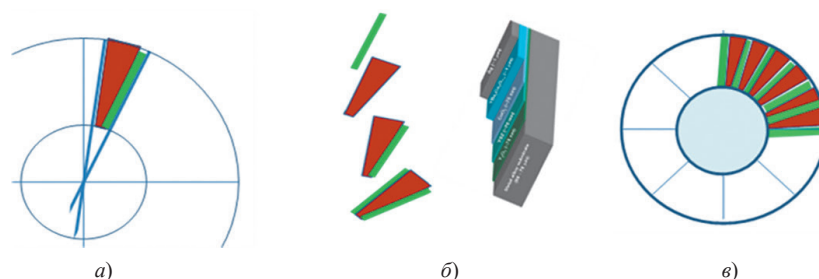


Рис. 4. Концепция проводника VS-типа (ВТСП-2 ленты показаны зеленым цветом): а – схема V-образного элемента; б – единичные элементы; в – схема ВТСП-ядра

Fig. 4. VS-type conductor concept (HTSP-2 tapes are shown in green): а – V-shaped element diagram; б – single elements; в – HTSP-core diagram

[14, 15] (рис. 3,б). На втором этапе несколько стопок лент собираются в токопроводящую жилу либо путем скручивания вокруг несверхпроводящего сердечника [13, 16, 17] (рис. 3,в, г и ж), либо путем размещения их параллельно [12] (рис. 3,а).

Конструкции на основе компактных скруток ВТСП-лент также весьма популярны.

Основным элементом в таких проводах является многослойная скрутка лент вокруг многопроволочного сердечника малого диаметра (рис. 3,д). Первичная многослойная скрутка была названа *CORC*-элементом [13–15], и, соответственно, провода называются проводами типа *CORC* [17–19]. На втором этапе первичные элементы скручиваются вокруг продольной оси проводника (рис. 3,е).

Для циркуляции хладагента и обеспечения механической прочности и стабильности сильноточные провода обычно заключаются в герметичную оболочку из нержавеющей стали.

Первичные элементы в *Stacked-Tape Conductors* и *CORC*-проводах не являются транспонированными, что приводит к разной индуктивности отдельных сверхпроводящих лент. Как известно, в параллельных сверхпроводящих цепях ток распределяется обратно пропорционально индуктивности цепей. Следовательно, ток в первичных элементах распределяется нерав-

номерно между ВТСП-лентами, что приводит к уменьшению критического тока проводника и увеличению потерь энергии при изменении индукции магнитного поля. Кроме того, конструкция *CORC* рыхлая и чувствительна к поперечным нагрузкам. В экспериментах были обнаружены потеря устойчивости и нарушение геометрии под воздействием поперечных электромагнитных сил [19].

Следует отметить, что существует несколько технических решений, позволяющих создавать транспонированные первичные элементы с равномерным распределением тока между ВТСП-лентами. Примером такого решения являются многоповивные конструкции жил сверхпроводящих силовых кабелей, в которых можно выровнять индуктивность повивов [20, 21] и добиться равномерного распределения токов. Однако в таких конструкциях, изначально предназначенных для работы в слабых магнитных полях, невозможно получить высокую инженерную плотность тока в сильных магнитных полях.

Так называемый кабель Рёбеля может быть использован в качестве полностью транспонированного первичного элемента [22, 23]. Однако это направление пока не получило достаточного развития из-за низких механических характеристик и высокой стоимости кабеля Рёбеля, при изготовлении которого значитель-

ная часть дорогостоящей ВТСП-ленты уходит в отходы. Недавно был предложен новый вариант создания транспонированного первичного элемента [7, 24, 25], который будет описан ниже.

Транспонированные провода типа VS VSS. Провода с токопроводящей жилой типа VS (*V-Shape*) являются полностью транспонированной конструкцией (рис. 4 и 5).

Общая концепция конструкции VS-провода [25]:

ВТСП-2-ленты расположены только в один слой и расположены радиально;

трапецевидные или треугольные вставки из не-сверхпроводящего материала, которые могут играть роль как упрочняющего, так и стабилизирующего материала, размещаются между лентами;

каждая лента (или две ленты) со вставкой образуют V-образные элементы, которые скручиваются вокруг сердечника.

Такой первичный элемент может использоваться как токопроводящий сердечник провода однократной скрутки, так и как первичный элемент в жиле двойной скрутки.

ВТСП-лента и клиновидная вставка могут быть предварительно спаяны или соединены непосредственно на первом этапе скрутки токопроводящего элемента. В этом случае лента контактирует со вставкой со стороны сверхпроводящего слоя, а контакт между VS-элементами происходит через два слоя хастеллоя, что увеличивает поперечное сопротивление сердечника и снижает потери энергии в нестационарных режимах. Границы элементов строго определены радиальными линиями. Такие элементы наматываются «на ребро» в один слой вокруг круглого опорного элемента и обматываются сверху фиксирующей лентой. Чтобы уменьшить влияние поперечной нагрузки на ВТСП-ленту, возможно изготовление трапецевидного элемента немного выше ширины ленты. В качестве материала для вставки можно использовать медь, алюминий, бронзу, латунь, медно-ниобиевую композицию, нержавеющую

сталь или другие материалы. Количество VS-элементов в структуре определяется как

$$N = 2\pi r / ((2a + b)k), \quad (1)$$

где r – радиус центрального опорного элемента; a – толщина ВТСП-ленты; b – ширина нижней части трапецевидного элемента; k – коэффициент скрутки.

Основные преимущества VS-конструкции:

полная транспозиция и, как следствие, высокая инженерная плотность тока и полное использование токопроводящей способности ВТСП-лент;

высокая жесткость конструкции за счет использования прочных клиновых вставок и защиты сверхпроводника от поперечных механических напряжений;

возможность легко изменять поперечное сопротивление провода и вихревые потери в нестационарных режимах работы за счет использования различных материалов;

широкие возможности изменения количества лент, поперечного сечения меди и диаметра элемента.

Недостатки VS-конструкции:

отсутствие опыта в изготовлении VS-элемента и технологии сборки жилы ВТСП-провода данного типа;

отсутствие информации о минимальном радиусе изгиба и результатах электрических испытаний.

На рис. 5 показаны варианты конструкции VS-проводов однократной скрутки. В качестве армирующего материала используется нержавеющая сталь, а стабилизирующего материала – медь или медно-ниобиевая композиция.

В таблице приведены конструктивные характеристики проводов однократной скрутки. Характеристики ленты на подложке толщиной 40 мкм с линейной критической плотностью тока шириной 150 А/мм в поле 14 Тл при 4,2 К принимаются за исходные. Рассматриваются структуры с общим критическим током до 120 кА в поле 14 Тл при 4,2 К. Тогда максимальная инженерная плотность тока в проводе CS при разме-

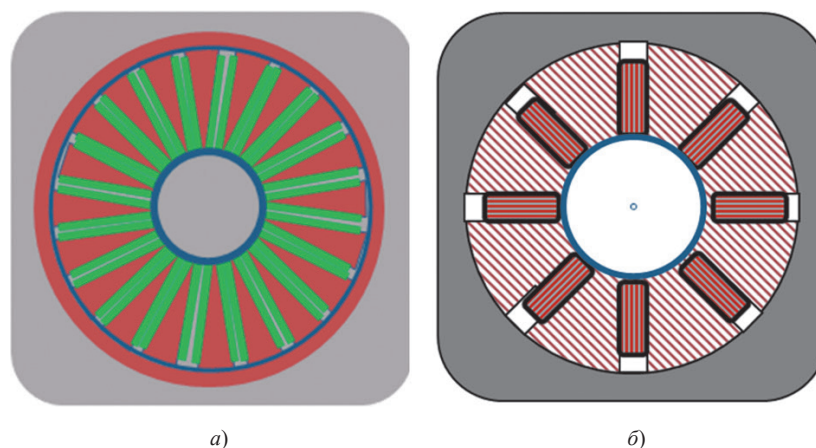


Рис. 5. Конструкции проводов: а – провод с жилой однократной скрутки VS-типа; б – провод с жилой двукратной сборки VSS-типа

Fig. 5. Wire designs: а – wire with a VS-type residential single twist; б – wire with a VSS-type residential double assembly

Оценка максимального расчетного критического тока и критической плотности тока в проводе VS-типа для центрального соленоида при 4,2 К и 14 Тл

Estimation of the maximum calculated critical current and critical current density in a VS-type wire for a central solenoid at 4.2 K and 14 T

Конструкция	Ширина ленты, мм	Толщина ленты и вставки (a + b), мкм	Диаметр формера, мм	Число VS-элементов	Макс. ток, кА	Макс. J_c , А/мм ²
VS1-4	4	56+56	5,7	160	96	142
VS10-4	4	56+0	3,6	200	120	178
VS2-4	4	2×56+56	5,4	100	120	178
VS20-4	4	2×56+0	3,4	100	120	178
VS2-3	3	2×56+56	3,6	67	60	89
VS20-3	3	2×56+0	3,6	100	90	133

рах 26×26 мм² составляет 178 А/мм², что в два раза превышает требуемое рабочее значение 89 А/мм². Это означает, что одножильные проводники с максимальным током 120 кА при 4,2 К обеспечивают требуемый двойной запас по току при 4,2 К. Критический ток проводов при 20 К составляет 64 кА, а запас по току – всего 1,067, что несколько меньше требуемого значения. Принимая во внимание, что максимальная температура обмотки достигается в конце цикла зарядки и начале цикла охлаждения, такой небольшой запас тока может быть приемлемым.

Из таблицы следует, что наиболее подходящими для транспонированных проводов однократной скрутки являются конструкции VS10-4, VS2-4 и VS20-4, которые обеспечивают максимальную требуемую инженерную плотность тока для провода центрального соленоида.

Общее поперечное сечение сверхпроводящих элементов в условных конструкциях, показанных в [4], составляет 127 мм². В конструкциях VS2-4 и VS20-4 сверхпроводящего сердечника поперечные сечения с учетом поперечных сечений вставок составляют 120 и 95 мм². Это означает, что появляется дополнительная возможность либо уменьшить размеры провода с соответствующим увеличением плотности тока, либо повысить его защиту.

Конструкции VS1-4 и VS10-4 также представляют интерес, однако они состоят из большого количества элементов, что может представлять определенные трудности при скрутке ВТСП-жилы провода. Как видно

из таблицы, при изготовлении сердечника VS используется большое количество первичных элементов (67–200 шт.). Для скручивания такого количества элементов использование классических крутильных машин нецелесообразно. Это связано с тем, что в таких машинах скручивание осуществляется путем вращения отдающих катушек, расположенных во вращающейся клетке [26]. Стандартное количество отдающих катушек составляет 6, 12, 18 и 24 шт. Представляется более рациональным использовать машины типа *Dram-Twister*. В таких машинах отдающие катушки расположены на неподвижных стойках, а скручивание жилы происходит за счет вращения приемного барабана (рис. 6).

Технологическую операцию скрутки можно значительно упростить, сгруппировав часть ВТСП-лент в пакеты, как показано на рис. 5,б (VS-тип). В этой конструкции ленты сгруппированы в восемь пакетов, обернутых металлическими лентами, например из титана или нержавеющей стали. Общее количество лент такое же, как и в конструкциях VS2-4 и VS20-4. Количество пакетов может варьироваться в широких пределах. Трапецевидные вставки изготовлены из нормально проводящего материала. В этой конструкции отсутствует транспозиция лент внутри пакета относительно их собственного поля; однако расположение лент радиально в один слой обеспечивает транспозицию упаковок относительно внешнего поля.

Таким образом, предлагаемые конструкции проводов типа VS позволяют достичь характеристик,

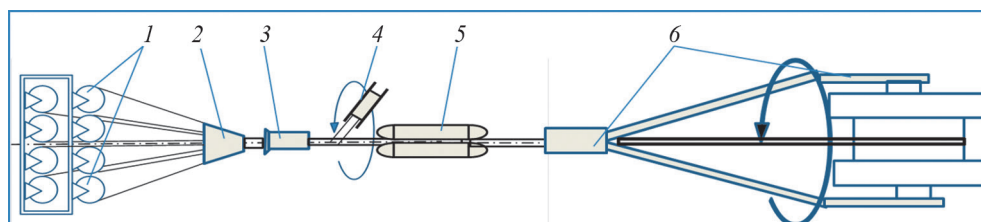


Рис. 6. Схема машины типа *Dram-Twister*: 1 – отдающие катушки на стойках; 2 – формующее устройство; 3 – калибр; 4 – обмотчик; 5 – гусеничная тяга; 6 – вращающийся приемный барабан

Fig. 6. Diagram of a *Dram-Twister* type machine: 1 – recoil coils on racks; 2 – forming device; 3 – caliber; 4 – winding; 5 – crawler rod; 6 – rotating receiving drum

требуемых для ЭМС ТРТ. Предлагаемое техническое решение позволяет использовать полностью транспонированную конструкцию однократной скрутки для ВТСП-проводников магнитных систем современных термоядерных установок. До сих пор полностью транспонированная конструкция для таких магнитных систем не была предложена ни в России, ни в мире.

В качестве следующего этапа разработки должны быть проведены исследования в области электродинамики, технологические и электрофизические испытания образцов предлагаемых конструкций.

Распределение магнитного поля и оценка гистерезисных потерь энергии в проводах IS -типа. ЭМС ТРТ состоит из большого количества электромагнитных катушек (рис. 1), которые могут влиять на поле в объеме CS . Однако основным является поле центрального соленоида. Проводник в обмотке CS подвержен влиянию собственного магнитного поля проводника и внешнего поля соленоида (рис. 7).

Максимальное поле достигает 14 Тл. При этом, учитывая размеры обмотки CS , указанные на рис. 7, максимальная плотность тока в пакете обмоток должна быть на уровне 70 А/мм². По длине проводника индукция в середине ленты изменяется в пределах 2,5 Тл, и ориентация ленты по отношению к вектору магнитной индукции также изменяется. Магнитное поле может изменяться примерно на 2 Тл по ширине ВТСП-ленты. В этих условиях точный расчет потерь энергии затруднен. В качестве первого шага оценим влияние ориентации ленты и транспортного тока на гистерезисные потери в ней.

Следует отметить, что в [27] рассматривался вопрос расчета потерь переменного тока в радиально расположенных ВТСП-лентах. Однако рассмотрение проводилось только для малых магнитных полей с параллель-

ными и противоположными токами в соседних лентах, т.е. для условий, характерных для силовых кабелей.

Ранее на основе метода конечных элементов (МКЭ) была разработана численная модель для расчета транспортных потерь I_{tr} (только собственное поле) в стопках ВТСП-2-лент [28]. Модель разработана с помощью программного комплекса *ANSYS (EMAG software, A/A-V формулировка)*. Эта модель была модифицирована для ВТСП-2-лент, несущих переменный транспортный ток при синхронном изменяющемся внешнем магнитном поле B_a [29]. Исследование с помощью данной модели поможет понять роль угла между магнитным полем и поверхностью ВТСП-2-ленты при одновременном воздействии B_a и I_{tr} . Амплитуда тока в лентах варьируется от 0 до 300 А, а амплитуда внешнего поля – от 0 до 14 Тл. Влияние изменения полоидальных полей на кооперативные потери здесь не учитывалось из-за их малости. Рассмотрен вариант нахождения ленты, несущей ток во внешнем однородном магнитном поле. Для сравнения с известными аналитическими моделями принято, что критический ток лент постоянен и равен критическому току при 14 Тл (рис. 2). Аналитические модели: внешнее переменное поле прикладывается перпендикулярно широкой поверхности ленты при нулевом транспортном токе (модель Брандта [30]); переменный ток при нулевом внешнем поле (модели Норриса [31]). Рис. 8 иллюстрирует результаты расчетов.

Полученные результаты (рис. 8) демонстрируют сильную зависимость гистерезисных потерь в ленте от ее ориентации по отношению к вектору магнитной индукции. Влияние транспортного тока на гистерезисные потери практически отсутствует, что неудивительно, учитывая, что максимальный рабочий ток ленты 300 А составляет всего 50 % критического значения.

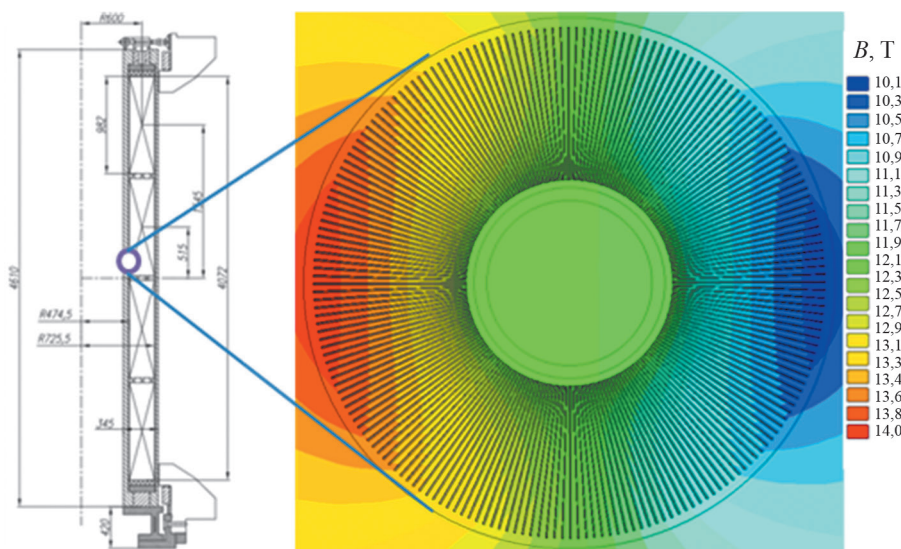


Рис. 7. Распределение магнитного поля в центральном витке соленоида при рабочем токе 60 кА

Fig. 7. Distribution of the magnetic field in the central coil of the solenoid at an operating current of 60 kA

Провод *RaST*-типа на базе пакетов лент. Общий вид и геометрия центрального соленоида TPT представлены на рис. 9, а и б. На рис. 9, в показано распределение магнитного поля в обмотке CS на момент достижения максимальной индукции магнитного поля на обмотке 14 Тл, что соответствует концу цикла зажига-

ния плазмы. Распределение осевой и радиальной составляющих вектора магнитной индукции на внутреннем витке обмотки показано на рис. 9, г и д. На верхнем и нижнем витках обмотки осевая составляющая поля находится на уровне 8 Тл, в то время как радиальная составляющая не превышает 10 мТл. Следовательно,

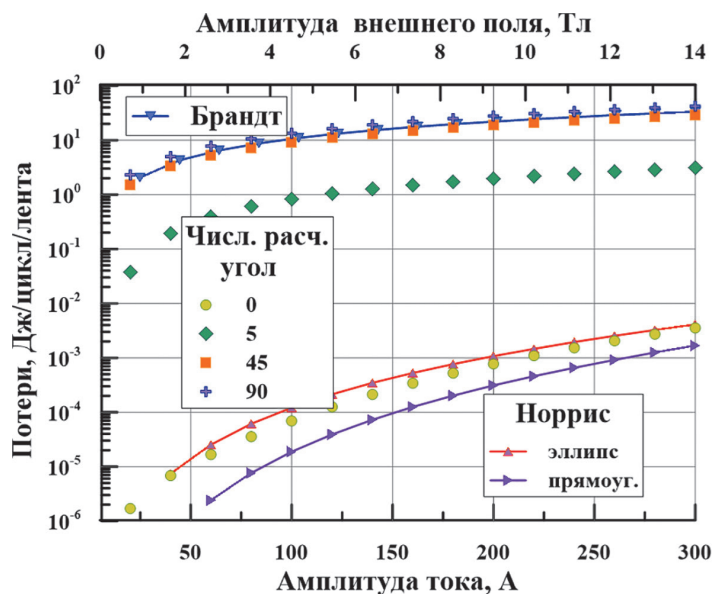


Рис. 8. Гистерезисные потери для различного угла между направлением вектора индукции магнитного поля и широкой поверхностью ВТСП-ленты, потери от транспортного тока по моделям Норриса и потери на намагничивание по модели Брандта

Fig. 8. Hysteresis losses for different angles between the direction of the magnetic field induction vector and the wide surface of the HTSP tape, losses from the transport current according to the Norris models and magnetization losses according to the Brandt model

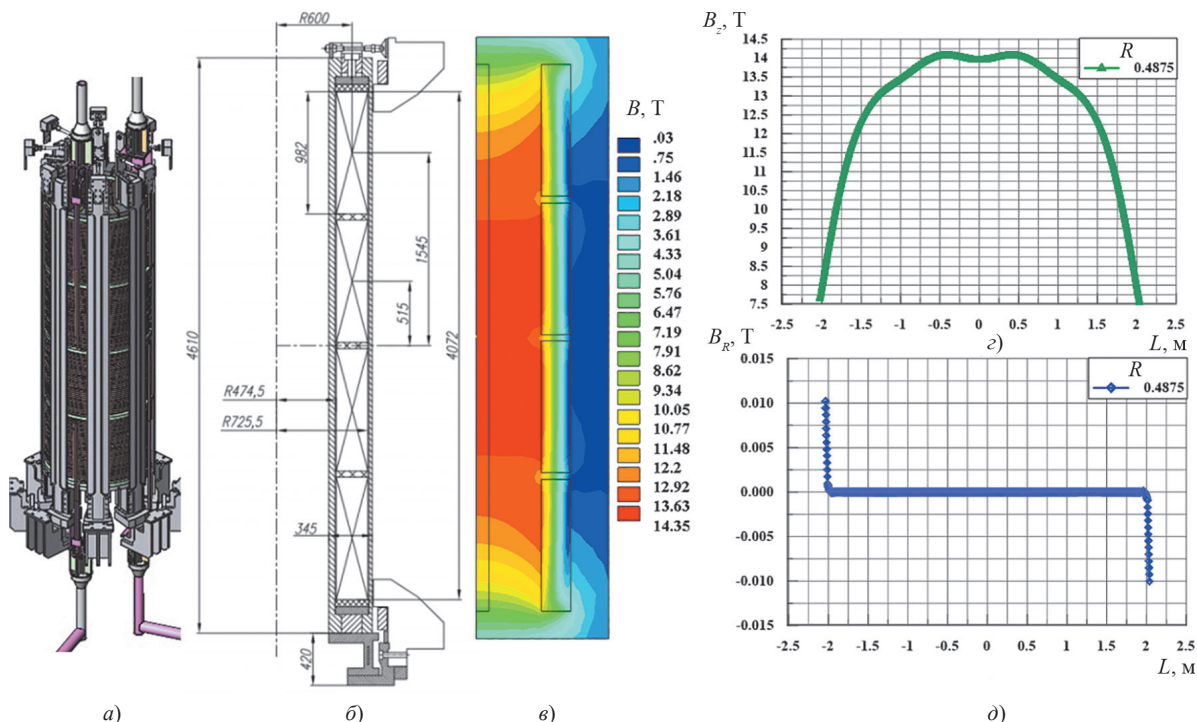


Рис. 9. Центральный соленоид: а – общий вид; б – схема; в – распределение магнитного поля; г и д – распределение осевой и радиальной составляющих поля на внутреннем слое соленоида

Fig. 9. Central solenoid: а – general view; б – diagram; в – magnetic field distribution; г and д – distribution of axial and radial components of the field on the inner layer of the solenoid

пропускная способность проводника по току определяется только осевой составляющей магнитного поля. Принимая во внимание зависимость токонесущей способности ленты от ориентации вектора индукции магнитного поля [5, 6], представляется целесообразным использовать проводник с расположением лент параллельно вектору индукции.

Мы называли эту конструкцию проводниками типа *PaST* (*Parallel Stacked Tapes*) [32]. Идея использования нескольких параллельных нескрученных стопок ВТСП-лент в качестве жилы сильноточного провода для тороидальных катушек была анонсирована на ASC14 [33]. Позже [34, 35] эти идеи были развиты и представлены основные рекомендации по проектированию провода.

Вариант конструкции провода типа *PaST*, адаптированный для использования в секциях *CS*, показан на рис. 10. Прямоугольный проводник имеет прочную стальную оболочку, сваренную из двух прокатанных профилей. Внутренняя токопроводящая часть имеет форму круга со снятыми боковыми фасками. Это делается для обеспечения ориентации пакетов ленты параллельно осевому полю соленоида.

Для достижения той же токоведущей способности провода, что и в конструкции *VS* 2-4, в каждой стопке должно быть 34 ленты шириной 6 мм. Однако при расчете конструкции *VS* 2-4 критический ток ленты был определен для поперечной ориентации вектора магнитной индукции к плоскости ленты. Как следует из рис. 10, когда лента ориентирована параллельно вектору поля, как в проводе типа *PaST*, критический ток ленты увеличивается в 4–5 раз. Следовательно, количество лент в прошлом проводнике может быть уменьшено в 2–3 раза до 12–17 лент в стопке. Такое решение нуждается в экспериментальном подтверждении. Каждая секция центрального соленоида подключена к отдельному источнику питания. Следовательно, можно использовать различные конструкции проводников в разных секциях *CS*, оптимизированных в соответствии с режимом работы секции.

Во время цикла зажигания и горения плазмы происходят потери энергии, приводящие к нагреву провода от начальной температуры порядка 5 К до 20 К, происходит также радиационный нагрев проводника. Рассчитанные потери энергии учитываются при выборе условий охлаждения, которые обеспечиваются прокачкой гелия по каналам проводника со скоростью потока 840 кг/ч. Следует также иметь в виду, что при быстром изменении поля происходит генерация наведенных токов в лентах, которые замыкаются через поперечное сопротивление контуров. Наведенные токи не должны превышать критического значения. Максимальное значение наведенных токов может ограничиваться путем введения резистивных прокладок между лентами (если это будет необходимо).

Принятие окончательного решения по конструкции проводника требует всесторонних теоретических

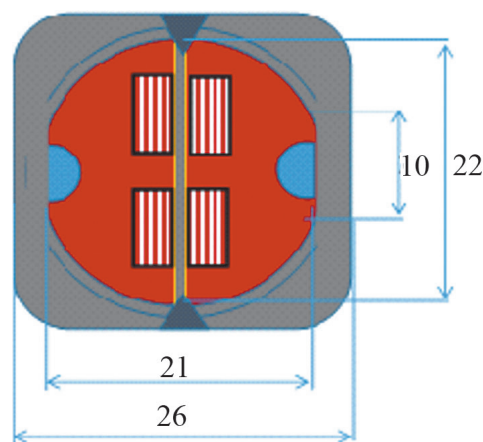


Рис. 10. Схема провода типа *PaST*

Fig. 10. Wire diagram of the *PaST* type

и экспериментальных исследований с учетом режимов работы как всей электромагнитной системы токамака, так и секций центрального соленоида. Особое внимание следует обратить на изучение влияния механических нагрузок на токонесущую способность ВТСП-лент и пакетов лент. Планируется изготовление и первые экспериментальные исследования опытных образцов обоих типов.

Выводы. Разработка сильноточных высокополевых ВТСП-проводов для ЭМС термоядерного реактора является общемировой тенденцией, и работа на этом направлении активно проводится в ведущих лабораториях мира. Однако пока универсальных решений не существует и каждый проект требует разработки ВТСП-провода, оптимизированного в соответствии с конкретными требованиями. Предлагаемые конструкции проводов на основе ВТСП-2-лент с достигнутым на сегодня уровнем свойств позволяют надеяться на достижение необходимых характеристик проводов для изготовления катушек *CS* реактора TPT.

Широкие возможности изменения характеристик проводников *VS* и *PaST* делают их перспективными для дальнейшего совершенствования при изменении характеристик материалов или требований, предъявляемых ЭМС TPT.

Основной задачей в настоящее время является проведение полномасштабных теоретических и технологических исследований предлагаемых конструкций проводников, изготовление и испытания опытных образцов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Menard J.E. Compact Steady-State Tokamak Performance Dependence on Magnet and Core Physics Limits. – Philosophical Transactions of the Royal Society, 2019, A 377: 20170440, DOI:10.1098/rsta.2017.0440.
2. Creely A.J. et al. Overview of the SPARC Tokamak. – Journal of Plasma Physics, 2020, vol. 86, 865860502, DOI:10.1017/S0022377820001257.
3. Красильников А.В. и др. Токамак с реакторными технологиями (TPT): концепция, миссия, основные особенности и ожидаемые характеристики. – Физика плазмы, 2021, т. 47, № 11, с. 970–985.

4. **Бондарчук Э.Н. и др.** Инженерно-технические аспекты электромагнитной системы установки TRT. – Физика плазмы, 2021, т. 47, № 12, с. 1070–1086.
5. **Molodyk A. et al.** Development and Large Volume Production of Extremely High Current Density YBaCu3O7 Superconducting Wires for Fusion. – Scientific Reports, 2021, vol. 11(1), DOI:10.1038/s41598-021-81559-z.
6. **ВТСП-провод** второго поколения [Электрон. ресурс]. URL: www.s-innovations.ru (дата обращения 10.10.2022).
7. **Sytnikov V.E. et al.** Advanced Variants of HTSC Wires for TRT Electromagnetic System. – Plasma Physics Reports, 2021, vol. 47(12), pp. 1204–1219, DOI:10.1134/S1063780X21110246.
8. **Kim M. et al.** Filamentization of YBCO Coated Conductors by Microcontact Printing. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2013, vol. 23, No. 3, 6601304, DOI:10.1109/TASC.2012.2236811.
9. **Bruzzone P. et al.** High Temperature Superconductors for Fusion Magnets. – Nuclear Fusion, 2018, vol. 58, No. 10, DOI:10.1088/1741-4326/aad835.
10. **Ten Kate H.** Super-Conductors for Successful Magnets. – IEEE/CSC & ESAS Superconductivity News Forum, 2019, Plenary Presentation at MT26, Vancouver, Canada.
11. **Terazaki Y. et al.** Measurement and Analysis of Critical Current of 100-kA Class Simply-Stacked HTS Conductors. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2015, vol. 25, No. 3, 4602905.
12. **Celentano G. et al.** Design of an Industrially Feasible Twisted-Stack HTS Cable-in-Conduit Conductor for Fusion Application. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2013, vol. 24(3), DOI:10.1109/TASC.2013.2287910.
13. **Wolf M.J. et al.** HTS CroCo a Stacked HTS Conductor Optimized for High Currents and Long Length Production. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, vol. 26, No. 2, DOI:10.1109/TASC.2016.2521323.
14. **Takayasu M. et al.** HTS Twisted Stacked-Tape Cable Conductor. – Superconductor Science and Technology, 2012, vol. 25(1), DOI:10.1088/0953-2048/25/1/014011.
15. **Uglietti D.** Test of 60 kA Coated Conductor Cable Prototypes for Fusion Magnets. – Superconductor Science and Technology, 2015, vol. 28(12), DOI:10.1088/0953-2048/28/12/124005.
16. **Hartwig Z. et al.** VIPER: an Industrially Scalable High-Current High-Temperature Superconductor Cable. – Superconductor Science and Technology, 2020, 33(11), 11LT01, DOI:10.1088/1361-6668/abb8c0.
17. **Van der Laan D.C., Weiss J.D., McRae D.M.** Status of CORC Cables and Wires for Use in High-field Magnets and Power Systems a Decade after Their Introduction. – Superconductor Science and Technology, 2019, vol. 32(3), 033001, DOI:10.1088/1361-6668/aafc82.
18. **Weiss J. et al.** Introduction of CORC® Wires: Highly flexible, Round High-Temperature Superconducting Wires for Magnet and Power Transmission Applications. – Superconductor Science and Technology, 2017, vol. 30(1), DOI:10.1088/0953-2048/30/1/014002.
19. **Mulder T. et al.** Recent Progress in the Development of CORC Cable-In-Conduit Conductors. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2020, vol. 30, No. 4, DOI:10.1109/TASC.2020.2968251.
20. **Sytnikov V.E. et al.** Influence of the Multilayer HTC-Cable Conductor Design on the Current Distribution. – Physica C: Superconductivity and Its Applications, 1998, 310, pp. 387–391, DOI: 10.1016/S0921-4534(98)00497-3.
21. **Fetisov S.S. et al.** Compact 2G HTS Power Cable: New Cold Tests Results. – Journal of Physics: Conference Series, 2020, vol. 1559, No.1, p. 012081, DOI:10.1088/1742-6596/1559/1/012081.
22. **Goldacker W. et al.** High Current DyBCO-ROEBEL Assembled Coated Conductor (RACC). – Journal of Physics: Conference Series, 2006, 43(1), DOI:10.1088/1742-6596/43/1/220.
23. **Long N.J. et al.** Development of YBCO Roebel Cables for High Current Transport and Low AC Loss Applications. – Journal of Physics: Conference Series, 2010, vol. 234(2), DOI:10.1088/1742-6596/234/2/022021.
24. **Сытников В.Е., Лелехов С.А.** Новая конструкция сверхпроводящего провода типа *cable-in-conduit* для крупных маг-

нитов. – Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез, 2020, т. 43, вып. 3, с. 31–40.

25. **Sytnikov V.E., Lelekhov S.A.** New HTS Conductor Design for Large Scale Applications. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, vol.31, No 5, DOI:10.1109/TASC.2021.3063070.

26. **TCS Machinery & Service SRL** [Электрон. ресурс], URL: www.tcsmachinery.com (дата обращения 10.10.2022).

27. **Mawatari Y.** Alternating Current Loss in Radially Arranged Superconducting Strips. – Applied Physics Letters, 2006, vol. 88, 092503, DOI: 10.1063/1.2180875.

28. **Zubko V., Zanezin S., Fetisov S.** Models for optimization and AC Losses Analysis in a 2G HTS Cable. – Journal of Physics: Conference Series, 2021, vol. 2043, No 1, DOI:10.1088/1742-6596/2043/1/012004.

29. **Zanezin S.Yu. et al.** Experimental and Numerical Study of AC Losses in HTS Coils of AC Electric Machines. – Russian Electrical Engineering, 2022, vol. 93, No 6, p. 424–429, DOI:10.3103/S1068371222060104.

30. **Brandt E.** Superconductors of Finite Thickness in a Perpendicular Magnetic Field: Strips and Slabs. – Physical Review B, 1996, vol. 54, pp. 4246–4264, DOI: 10.1103/PhysRevB.54.4246.

31. **Norris W.** Calculation of Hysteresis Losses in Hard Superconductors Carrying AC: Isolated Conductors and Edges of Thin Sheets. – Journal of Physics D: Applied Physics, 2002, vol. 3(4), DOI:10.1088/0022-3727/3/4/308.

32. **Lelekhov S.A., Sytnikov V.E.** Conductor Design for Toroidal Field Coils of a High Magnetic Field Tokamak TRT. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2022, vol. 32, No. 6, 4201805.

33. **Lelekhov S.** The Usage Experience of High Current Conductor with Parallel SC Wires for Magnets. – ASC14, ID 1951493, 3LPo2J-01, Charlotte, 2014, p. 181.

34. **Lelekhov S.A.** Analysis of a Possibility to Use Parallel Non-Twisted Stacks of HTS Tapes as Cable in High Current Conductor of Tokamak Toroidal Field Coils. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, vol.31, No 5, DOI:10.1109/TASC.2021.3069322.

35. **Uglietti D. et al.** Non-Twisted Stacks of Coated Conductors for Magnets: Analysis of Inductance and AC Losses. – Cryogenics, 2020, vol. 110, DOI:10.1016/j.cryogenics.2020.103118.

Поступила в редакцию [27.10.2022]

Принята к публикации [17.11.2022]

Авторы:



Сытников Виктор Евгеньевич – доктор техн. наук, заместитель научного руководителя АО «НТЦ ФСК ЕЭС», Москва, Россия.



Лелехов Сергей Андреевич – кандидат физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник ЧУ «ИТЭР – Центр», Москва, Россия.



Зубко Василий Васильевич – доктор техн. наук, главный научный сотрудник ОАО «ВНИИКП»; главный специалист АО «НТЦ ФСК ЕЭС», Москва, Россия.

Development of a Superconducting Wire for the Central Solenoid of a Tokamak with Reactor Technologies (TRT)

SYTNIKOV Viktor E. (JSC "STC FGC UES", Moscow, Russia) – Deputy Scientific Director; Dr. Sci. (Eng.).

LELEKHOV Sergey A. (Private institution "ITER – Center", Moscow, Russia) – Leading Researcher; Cand. Sci. (Phys.-Math.).

ZUBKO Vasily V. (JSC "VNIKP"; JSC "STC FGC UES", Moscow, Russia) – Chief Researcher; Chief Specialist; Dr. Sci. (Eng.).

The article presents the results of the preliminary development of a superconducting wire based on the VS type design and parallel tape packages for the central solenoid of a compact tokamak with reactor technologies (TRT). One of the main problems that must be solved for successfully implementing such projects is to develop high-current high-temperature superconducting (HTS) conductors for toroidal excitation coils and central solenoid sections. The magnetic system compactness entails the need to develop a conductor with a high engineering current density up to 90 A/mm². The operating current in the windings should be at a level of 60 kA at 15 K in a magnetic field of 15 T. The wire in the central solenoid experiences significant mechanical loads caused by Lorentz forces. In addition, in view of a significant energy stored in the magnet, there is a need to have elements in the conductor able to perform emergency evacuation of energy with an acceptable voltage across the winding and its heating that will not entail damage to its elements. The conductor structure should have enough space to accommodate stabilizing and strengthening materials, as well as cooling channels. Two design versions of the VS type conductor based on radially arranged second-generation HTS tapes and based on parallel packages are considered. The design characteristics of the proposed conductors are analyzed for various operating modes of the tokamak electromagnetic system. The results of FEM-based calculations of the magnetic field distribution in a conductor; its current carrying capacity and energy loss estimation in a varying magnetic field are presented.

Key words: central solenoid, conductor design, operating current, HTS-2 tapes

REFERENCES

1. Menard J.E. Compact Steady-State Tokamak Performance Dependence on Magnet and Core Physics Limits. – Philosophical Transactions of the Royal Society, 2019, A 377: 20170440, DOI:10.1098/rsta.2017.0440.
2. Creely A.J. et al. Overview of the SPARC Tokamak. – Journal of Plasma Physics, 2020, vol. 86, 865860502, DOI:10.1017/S0022377820001257.
3. Krasil'nikov A.V. et al. Fizika plazmy – in Russ. (Plasma Physics), 2021, vol. 47, No. 11, pp. 970–985.
4. Bondarchuk E.N. et al. Fizika plazmy – in Russ. (Plasma Physics), 2021, vol. 47, No. 12, pp. 1070–1086.
5. Molodyk A. et al. Development and Large Volume Production of Extremely High Current Density YBa₂Cu₃O₇ Superconducting Wires for Fusion. – Scientific Reports, 2021, vol. 11(1), DOI:10.1038/s41598-021-81559-z.
6. VTSP-provod vtorogo pokoleniya (HTSP-Second Generation Wire) [Electron. resource], URL: www.s-innovations.ru (Date of appeal 10.10.2022).
7. Sytnikov V.E. et al. Advanced Variants of HTSC Wires for TRT Electromagnetic System. – Plasma Physics Reports, 2021, vol. 47(12), pp. 1204–1219, DOI:10.1134/S1063780X21110246.
8. Kim M. et al. Filamentization of YBCO Coated Conductors by Microcontact Printing. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2013, vol. 23, No. 3, 6601304, DOI:10.1109/TASC.2012.2236811.
9. Bruzzone P. et al. High Temperature Superconductors for Fusion Magnets. – Nuclear Fusion, 2018, vol. 58, No. 10, DOI:10.1088/1741-4326/aad835.
10. Ten Kate H. Super-Conductors for Successful Magnets. – IEEE/CSC & ESAS Superconductivity News Forum, 2019, Plenary Presentation at MT26, Vancouver, Canada.
11. Terazaki Y. et al. Measurement and Analysis of Critical Current of 100-kA Class Simply-Stacked HTS Conductors. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2015, vol. 25, No. 3, 4602905.
12. Celentano G. et al. Design of an Industrially Feasible Twisted-Stack HTS Cable-in-Conduit Conductor for Fusion Application. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2013, vol. 24(3), DOI:10.1109/TASC.2013.2287910.
13. Wolf M.J. et al. HTS CroCo a Stacked HTS Conductor Optimized for High Currents and Long Length Production. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, vol. 26, No. 2, DOI:10.1109/TASC.2016.2521323.
14. Takayasu M. et al. HTS Twisted Stacked-Tape Cable Conductor. – Superconductor Science and Technology, 2012, vol. 25(1), DOI:10.1088/0953-2048/25/1/014011.
15. Uglietti D. Test of 60 kA Coated Conductor Cable Prototypes for Fusion Magnets. – Superconductor Science and Technology, 2015, vol. 28(12), DOI:10.1088/0953-2048/28/12/124005.
16. Hartwig Z. et al. VIPER: an Industrially Scalable High-Current High-Temperature Superconductor Cable. – Superconductor Science and Technology, 2020, 33(11), 11LT01, DOI:10.1088/1361-6668/abb8c0.
17. Van der Laan D.C., Weiss J.D., McRae D.M. Status of CORC Cables and Wires for Use in High-field Magnets and Power Systems a Decade after Their Introduction. – Superconductor Science and Technology, 2019, vol. 32(3), 033001, DOI:10.1088/1361-6668/aafc82.
18. Weiss J. et al. Introduction of CORC® Wires: Highly flexible, Round High-Temperature Superconducting Wires for Magnet and

Power Transmission Applications. – Superconductor Science and Technology, 2017, vol. 30(1), DOI:10.1088/0953-2048/30/1/014002.

19. **Mulder T. et al.** Recent Progress in the Development of CORC Cable-In-Conduit Conductors. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2020, vol. 30, No. 4, DOI:10.1109/TASC.2020.2968251.

20. **Sytnikov V.E. et al.** Influence of the Multilayer HTC-Cable Conductor Design on the Current Distribution. – Physica C: Superconductivity and Its Applications, 1998, 310, pp. 387–391, DOI: 10.1016/S0921-4534(98)00497-3.

21. **Fetisov S.S. et al.** Compact 2G HTS Power Cable: New Cold Tests Results. – Journal of Physics: Conference Series, 2020, vol. 1559, No.1, p. 012081, DOI:10.1088/1742-6596/1559/1/012081.

22. **Goldacker W. et al.** High Current DyBCO-ROEBEL Assembled Coated Conductor (RACC). – Journal of Physics: Conference Series, 2006, 43(1), DOI:10.1088/1742-6596/43/1/220.

23. **Long N.J. et al.** Development of YBCO Roebel Cables for High Current Transport and Low AC Loss Applications. – Journal of Physics: Conference Series, 2010, vol. 234(2), DOI:10.1088/1742-6596/234/2/022021.

24. **Sytnikov V.E., Lelekhov S.A.** *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Termoyadernyy sintez – in Russ. (Issues of Atomic Science and Technology. Series: Thermonuclear Fusion)*, 2020, vol. 43, iss. 3, pp. 31–40.

25. **Sytnikov V.E., Lelekhov S.A.** New HTS Conductor Design for Large Scale Applications. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, vol.31, No 5, DOI:10.1109/TASC.2021.3063070.

26. **TCS Machinery & Service SRL** [Electron. resource], URL: www.tcsmachinery.com (Date of appeal 10.10.2022).

27. **Mawatari Y.** Alternating Current Loss in Radially Arranged Superconducting Strips. – Applied Physics Letters, 2006, vol. 88, 092503, DOI: 10.1063/1.2180875.

28. **Zubko V., Zanezin S., Fetisov S.** Models for optimization and AC Losses Analysis in a 2G HTS Cable. – Journal of Physics: Conference Series, 2021, vol. 2043, No 1, DOI:10.1088/1742-6596/2043/1/012004.

29. **Zanezin S.Yu. et al.** Experimental and Numerical Study of AC Losses in HTS Coils of AC Electric Machines. – Russian Electrical Engineering, 2022, vol. 93, No 6, p. 424–429, DOI:10.3103/S1068371222060104.

30. **Brandt E.** Superconductors of Finite Thickness in a Perpendicular Magnetic Field: Strips and Slabs. – Physical Review B, 1996, vol. 54, pp. 4246–4264, DOI: 10.1103/PhysRevB.54.4246.

31. **Norris W.** Calculation of Hysteresis Losses in Hard Superconductors Carrying AC: Isolated Conductors and Edges of Thin Sheets. – Journal of Physics D: Applied Physics, 2002, vol. 3(4), DOI:10.1088/0022-3727/3/4/308.

32. **Lelekhov S.A., Sytnikov V.E.** Conductor Design for Toroidal Field Coils of a High Magnetic Field Tokamak TRT. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2022, vol. 32, No. 6, 4201805.

33. **Lelekhov S.** The Usage Experience of High Current Conductor with Parallel SC Wires for Magnets. – ASC14, ID 1951493, 3LPo2J-01, Charlotte, 2014, p. 181.

34. **Lelekhov S.A.** Analysis of a Possibility to Use Parallel Non-Twisted Stacks of HTS Tapes as Cable in High Current Conductor of Tokamak Toroidal Field Coils. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, vol.31, No 5, DOI:10.1109/TASC.2021.3069322.

35. **Uglietti D. et al.** Non-Twisted Stacks of Coated Conductors for Magnets: Analysis of Inductance and AC Losses. – Cryogenics, 2020, vol. 110, DOI:10.1016/j.cryogenics.2020.103118.

Received [27.10.2022]

Accepted [17.11.2022]