



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»**  
Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова  
Национального исследовательского центра  
«Курчатовский институт»

Препринт 2022–1

И.В. Богданов, С.С. Козуб, Л.М. Ткаченко, В.И. Шувалов

**СОЗДАНИЕ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ ВЫСОКО-  
ТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ**

Направлено в *ВАИТ*

Протвино 2022

**Аннотация**

Богданов И.В., Козуб С.С., Ткаченко Л.М., Шувалов В.И. Создание устройств на основе высокотемпературных сверхпроводников: Препринт НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ 2022–1. – Протвино, 2022. – 15 с., 11 рис., 4 табл., библиогр.: 8.

В статье представлены результаты проектирования и испытаний обмоток возбуждения ротора для прототипа сверхпроводящего синхронного электродвигателя мощностью 200 кВт и обмоток возбуждения ротора для прототипа сверхпроводящего синхронного генератора мощностью 1 МВА, а также первого российского дипольного магнита, изготовленного из ленты ВТСП второго поколения.

**Abstract**

Bogdanov I.V., Kozub S.C., Tkachenko L.M., Shuvalov V.I. Creation of Devices Based on High-Temperature Superconductors: NRC «Kurchatov Institute» – IHEP Preprint 2022–1. – Protvino, 2022. – p. 15, fig. 11, tables 4, refs.: 8.

The article presents the design and test results of excitation coils of the rotor of a prototype 200 kW superconducting synchronous electric motor and excitation coils of the rotor of a prototype 1 MVA superconducting synchronous generator as well as the first Russian dipole magnet made of HTS tape of the second generation.

## ***Введение***

В настоящее время во всем мире ведутся интенсивные разработки нового и перспективного направления в сверхпроводимости – использование высокотемпературных сверхпроводников второго поколения в энергетической промышленности [1-4]. Электрические машины с ВТСП-2 обмотками по сравнению с машинами, имеющими обмотки из традиционных проводников, позволяют существенно уменьшить габариты и вес электрических машин. Рейтрековые обмотки из ВТСП лент второго поколения представляют большой интерес не только для электрических машин, но и создания ВТСП магнитов для ускорителей заряженных частиц. Такие магниты позволят значительно повысить экономичность и эффективность работы такой высокоэнергоемкой системы, как ускоритель.

В статье представлены конструкция и результаты испытания полномасштабных рейтрековых обмоток возбуждения ротора опытного образца сверхпроводящего синхронного электродвигателя (СПСД) мощностью 200 кВт и полномасштабных рейтрековых обмоток возбуждения ротора опытного образца сверхпроводящего синхронного генератора (СПСГ) мощностью 1 МВА, изготовленных из ВТСП ленты второго поколения в ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ КИ, и проходящих испытания в составе этих электрических машин [5-6]. Также представлен дипольный магнит и основные результаты, полученные при его испытаниях.

### Конструкция ВТСП обмоток

Конструкция ВТСП обмоток СПСД и СПСГ представлена на рисунке 1.

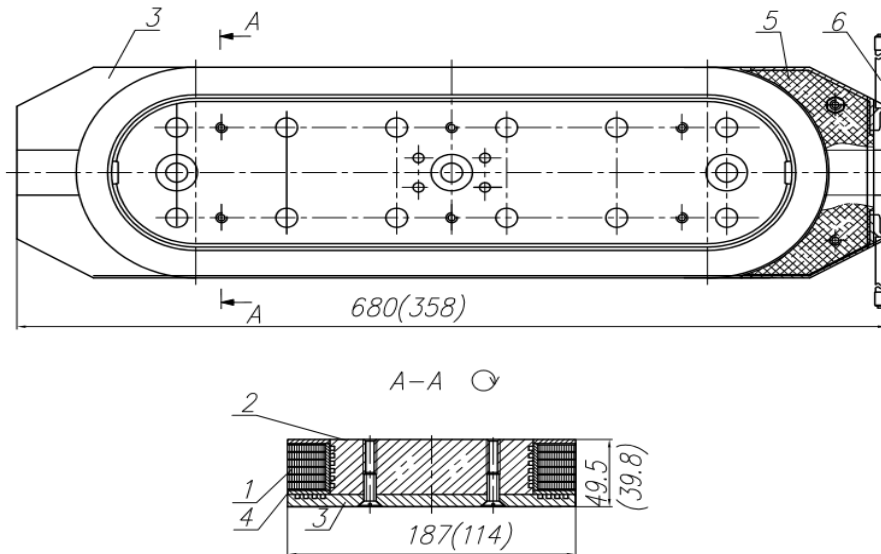


Рис. 1. ВТСП обмотка. 1 - шестислойная обмотка, 2 - полюс, 3 - пластина, 4 - каркас медный, 5 - вставка, 6 - выводы обмотки. Размеры без скобок для СПСГ, в скобках – для СПСД.

Обмотки СПСД и СПСГ отличаются размерами и отсутствием медного каркаса в обмотке СПСД. Обмотка состоит из трех двухслойных катушек типа рейстрек, намотанных на полюс из стали 3 ВТСП лентой компании American Superconductor (AMSC) с размерами поперечного сечения в изоляции  $4.93 \times (0.32-0.40)$  мм<sup>2</sup>. Толщина этой ленты в 1.5 раза выше по сравнению с лентой фирмы “SuperPower”, что связано с большим содержанием стабилизирующей меди и должно обеспечить большую устойчивость при переходе обмотки в нормальное состояние. Изоляция ВТСП ленты состоит из полиимидной пленки толщиной 13 мкм, шириной 10 мм с односторонним силиконовым клеящим покрытием толщиной 25 мкм, намотанной с перекрытием 50% (два слоя), итого 76 мкм на сторону.

Разброс толщины ВТСП лент от 0.32 до 0.40 мм обусловил разброс количества витков в обмотках СПСД (188 – 205) и СПСГ (381-393). В обмотке соединение концов двухслойных катушек осуществлялось пайкой по мостовой схеме на длине 60 мм. масса обмотки с полюсом составила 13 кг для СПСД и 51 кг для СПСГ. Обмотки СПСД и СПСГ представлены на рисунке 2.



Рис. 2. ВТСП обмотки СПСД (слева) и СПСГ (справа).

### **Результаты испытаний ВТСП обмоток**

Результаты испытаний обмоток СПСД при температуре 77 К представлены в таблице 1, где  $N$  - номер обмотки;  $n$  – число витков;  $I_0$  – критический ток ВТСП ленты (А) при 1 мкВ/см, 77 К в собственном поле;  $I_{c1}$  – критический ток обмотки в А при 1 мкВ/см;  $I_{c10}$  – критический ток обмотки в А при 10 мкВ/см;  $L$  – индуктивность обмотки в мГн,  $R$  - сопротивление при комнатной температуре, Ом.

Таблица 1. Результаты испытаний ВТСП обмоток СПСД при температуре 77 К.

$N$	$n$	$I_0, A$	$I_{c1}$	$I_{c10}$	$I_{c1}/I_0$	$L$	$R$
1	204	104-114	46.3	51.3	0.425	49	5.19
2	188	114-115	48.8	54.1	0.426	45	4.36
3	205	116	49.7	54.5	0.428	51	5.07
4	204	116-117	50	55.7	0.429	50	5.0
5	204	113-115	52.1	57.6	0.457	48	4.8
6	204	116-118	53	57.6	0.453	49	5.1
7	204	107-113	49.7	54.4	0.452	50	4.9

Критический ток обмоток СПСД находился в интервале 46.3 – 53.0 А и 51.3 – 57.6 А при падении напряжения на обмотке 1 мкВ/см и 10 мкВ/см, соответственно. Индуктивность обмоток составила 45 – 52 мГн, сопротивление находилось в интервале 4.6 – 5.19 Ом.

Результаты испытаний обмоток СПСГ при температуре 77 К представлены в таблице 2, где обозначения такие же, как и в таблице 1,  $I_{0mean}$  – усредненный ток обмотки  $I_0$ .

Таблица 2. Результаты испытаний ВТСП обмоток СПСГ при температуре 77 К.

N	n	$I_0$ , А	$I_{c1}$	$I_{c10}$	$I_{c1}/I_{0mean}$
1	387	98-105	40.3	44.7	0.41
2	388	103-112	42.4	47.3	0.41
3	387	104-112	43.9	48.9	0.42
4	388	103-106	39.4	44.0	0.38
5	387	103-112	42.3	47.5	0.41
6	381	103-108	41.0	45.7	0.40
7	383	98-109	41.3	45.9	0.42
8	386	103-112	40.1	44.6	0.39
9	393	94-112	41.5	46.4	0.44
10	384	106-114	43.5	48.5	0.41
11	390	94-115	42.3	47.1	0.45

При напряжениях, отвечающих критерию 1 и 10 мкВ/см, медиана значений токов для группы обмоток СПСГ составила 41.7 А и 46.5 А при разбросе значений  $\pm 2.3$  А и  $\pm 2.5$  А, соответственно. Индуктивность обмоток СПСГ равна 0.42 – 0.43 Гн, их сопротивление при комнатной температуре находилось в интервале 16.20–17.36 Ом.

На примере обмотки СПСГ проведен расчетный анализ величины ее критического тока. Расчет компонент магнитного поля проведен при токе в обмотке 50 А. Центр координат совпадает с центром полюса. Компоненты поля  $B_x$ ,  $B_y$  вдоль горизонтальной линии, проходящей через середину каждого слоя обмотки СПСГ от его внутреннего до наружного витков представлены на рисунках 3 и 4. Нумерация слоев снизу-вверх.

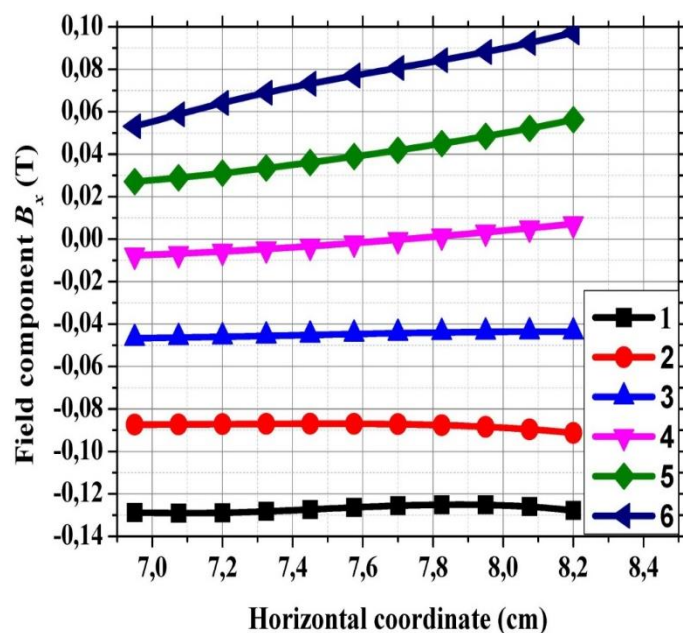


Рис. 3. Компонента поля  $B_x$  в обмотке СПСГ.

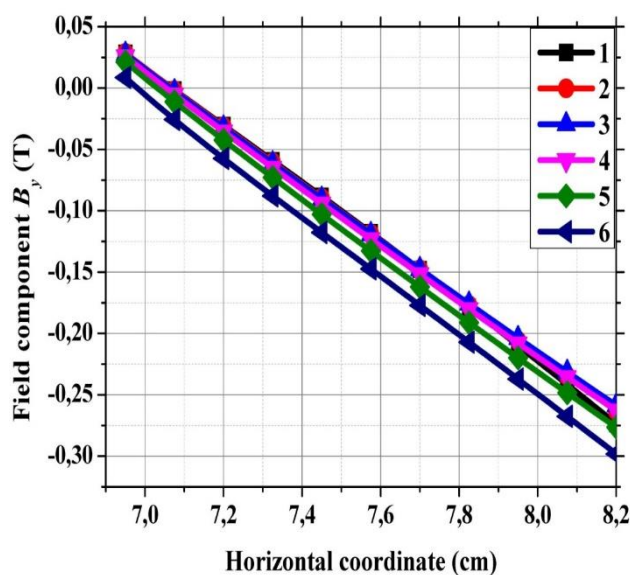


Рис. 4. Компонента поля  $B_y$  в обмотке СПСГ.

Компонента поля  $B_x$ , перпендикулярная ВТСП ленте, достигает максимального значения 0,13 Тл в витках первого (нижнего) слоя обмотки СПСГ. Продольная ВТСП ленте компонента  $B_y$  достигает максимального значения 0,27 Тл в наружном витке этого нижнего слоя.

На рисунке 5 представлена зависимость критического тока от магнитного поля при температуре 77 К ВТСП ленты “AMSC” [7]. Из этого рисунка следует, что при  $B_x =$

0.13 Тл критический ток составляет 0.3 – 0.7 от значения в нулевом поле. Влияние продольной компоненты слабее, при  $B_y$  равном 0.27 Тл критический ток составляет 0.5 – 0.6 от значения в нулевом поле. Данное снижение критического тока согласуется с результатами измерений, представленными в таблице 2. Это свидетельствует о том, что снижение критического тока ВТСП ленты обусловлено влиянием магнитного поля, создаваемого обмоткой.

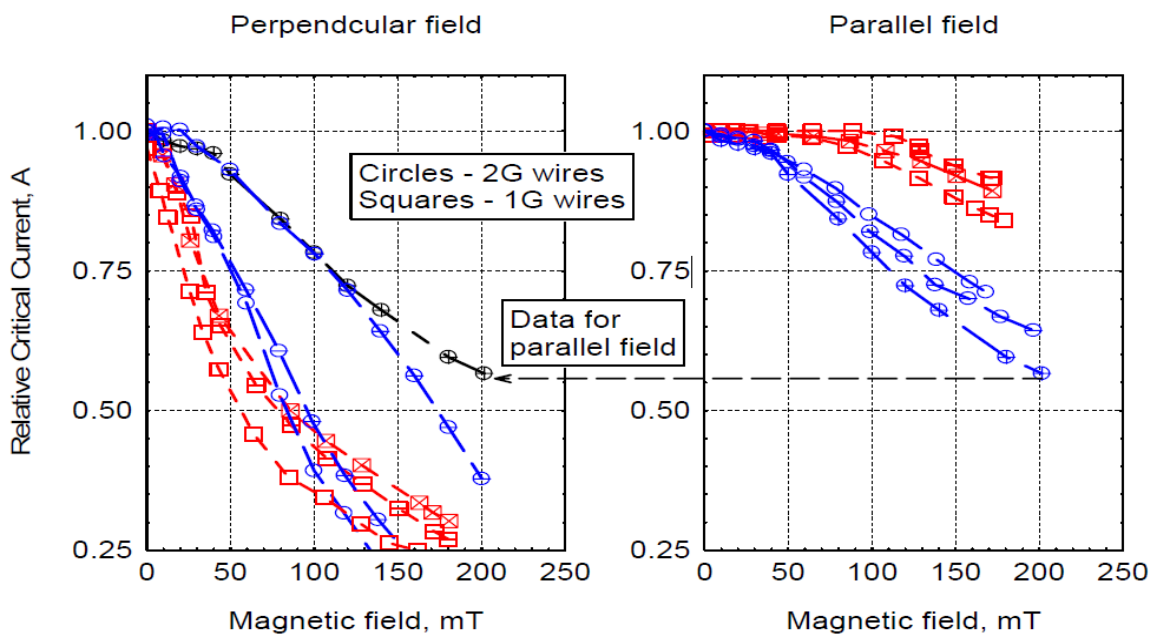


Рис. 5. Критический ток в перпендикулярном и продольном магнитном поле относительно широкой стороны ВТСП ленты “AMSC” при температуре 77 К [7]. □ – ВТСП лента первого поколения, ○ - ВТСП лента второго поколения.

Результаты расчета сил, действующих на слои обмотки СПСГ при токе 50 А в витке, представлены в таблице 3. Нумерация слоев обмотки производится от медианной плоскости вверх (1, 2, 3, которые составляют первый квадрант) и вниз (4, 5, 6, составляющие четвертый квадрант).



Таблица 3. Силы, действующие на обмотку СПСГ, Н/см.

Номер слоя обмотки	$F_x$	$F_y$	$ F $
1	-79.60	-2.48	79.64
2	-83.54	-19.18	85.71
3	-91.76	-35.28	98.31
Первый квадрант	-254.91	-56.94	261.19
4	-78.47	14.43	79.79
5	-79.91	31.15	85.77
6	-84.80	46.90	96.90
Четвертый квадрант	-243.18	92.48	260.17

Из этой таблицы видно, что по оси X обмотка прижимается к полюсу с суммарной силой около 500 Н/см, при этом в направлении перпендикулярном широкой стороне ВТСП ленты, максимальное давление на изоляцию ленты наблюдается в третьем слое и составляет 187 Н/см<sup>2</sup>. По оси Y слои четвертого квадранта обмотки прижимаются к полюсу с силой 92 Н/см, а максимальное давление на изоляцию ВТСП ленты в этом направлении не превышает 40 Н/см<sup>2</sup>.

### *Исследование процесса перехода в нормальное состояние ВТСП обмоток*

Исследование процесса перехода обмоток СПСД и СПСГ из сверхпроводящего в нормальное состояние проводились в ванне с жидким азотом при атмосферном давлении. Для обмотки СПСД №2 до тока 47.3 А (падение напряжения на обмотке 6.3 мВ, мощность тепловыделения 0.27 Вт) не происходило значительного роста напряжения на обмотке (температуры нормальной зоны), нормальная зона в обмотке находилась в тепловом равновесии с охлаждающим ее жидким азотом. При дальнейшем увеличении тока всего на 0.3 А происходило нарушение этого равновесия и при мощности тепловыделений 0,3 Вт начинался резкий рост падения напряжения на обмотке (температуры нормальной зоны). Таким образом, для этой обмотки пороговое значение тока равно 47.6 А и оно близко к значению тока 48.8 А, соответствующего падению напряжения на обмотке 1 мкВ/см.

На рисунке 6 приведены временные зависимости падения напряжения на обмотке СПСД при токах, значительно превышающих пороговый ток перехода в нормальное состояние. До тока 95 А, превышающего пороговое значение в два раза, не происходило повреждения обмотки.

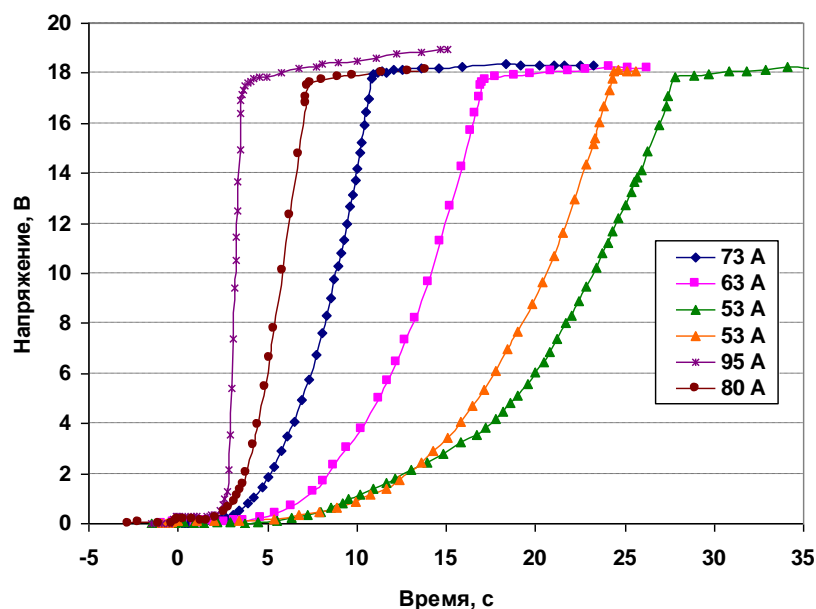


Рис. 6. Падение напряжения на обмотке №2 СПСД в процессе перехода в нормальное состояние при токах, превышающих пороговое значение.

После достижения на обмотке падения напряжения 18 В, ограниченного возможностями источника питания, ток в обмотке уменьшался за счет роста сопротивления обмотки СПСД и устанавливалось новое стационарное состояние между нормальной зоной в обмотке и охлаждающим ее азотом при токе 10.6 А, что соответствовало мощности тепловыделений 190 Вт. На рисунке 7 показаны величина тока и падения напряжения на обмотке СПСД в процессе перехода в стационарное состояние при начальном токе 52 А. Видно, что в процессе этого перехода мощность тепловыделений в нормальной зоне обмотки достигала 800 Вт. После вывода тока не обнаружено снижения критического тока ВТСП обмотки.

В целом все вышесказанное справедливо и для обмотки СПСГ. В обмотке №11 до тока 42.3 А (падение напряжения на обмотке 37 мВ, мощность тепловыделений 1.57 Вт) тепловыделения в нормальной зоне находились в тепловом равновесии с охлаждающим обмотку жидким азотом. При дальнейшем увеличении тока до 42.8 А происходило нарушение этого равновесия и при мощности тепловыделений 1.93 Вт начинался резкий рост падения напряжения на обмотке. Таким образом, для этой обмотки пороговое значение тока равно 42.8 А и оно близко к значению тока 42.3 А, соответствующего падению напряжения на обмотке 1 мкВ/см.

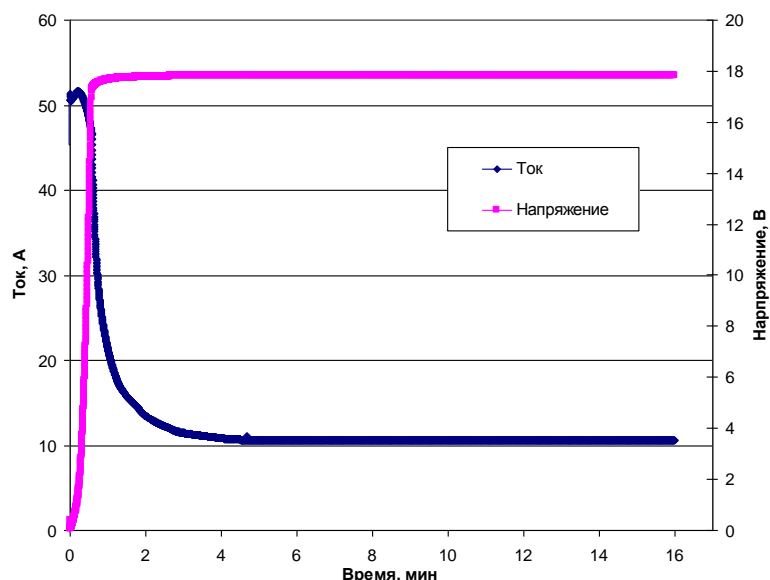


Рис. 7. Изменение тока и напряжения в обмотке №2 СПСД в процессе перехода в нормальное состояние при начальном токе 52 А и охлаждении жидким азотом.

На рисунке 8 приведены временные зависимости падения напряжения на обмотке СПСГ при токах, значительно превышающих пороговое значение тока перехода в нормальное состояние. До тока 54 А, связанного с возможностями источника тока и заметно превышающего пороговое значение, не происходило повреждения обмотки СПСГ. После достижения на обмотке падения напряжения 18 В, ограниченного возможностями источника питания, ток в обмотке уменьшался за счет роста ее сопротивления и устанавливалось новое стационарное состояние между нормальной зоной в обмотке и охлаждающим ее азотом при токе 5.8 А, что соответствовало мощности тепловыделений 104 Вт.

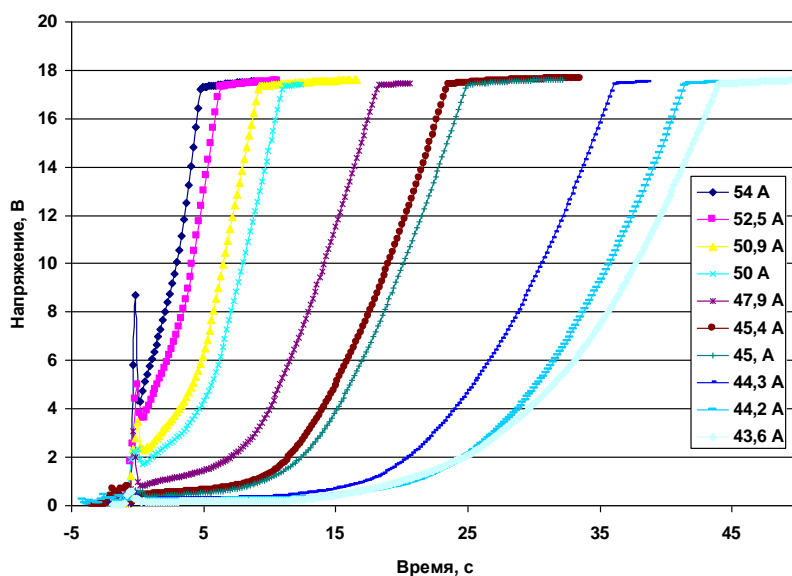


Рис. 8. Падение напряжения на обмотке №11 СПСГ в процессе перехода в нормальное состояние при токах, превышающих пороговое значение.

Для защиты при переходе в нормальное состояние обмоток СПСД и СПСГ рекомендуется не превышать порогового значения тока, которое составило 47.3 А для обмотки №2 СПСД и 42.3 А для обмотки №11 СПСГ.

Целесообразно использовать для работы на постоянном токе источники с небольшим выходным напряжением, например, уровень напряжения 18 В для этих обмоток является безопасным. Процесс разогрева идет медленно, собственная запасенная энергия на разогрев проводника влияет мало и после достижения максимального напряжения источника за счет роста сопротивления обмотки ток в обмотке уменьшается и устанавливается новое стационарное состояние между нормальной зоной в обмотке и охлаждающим ее азотом.

### ***HTS-2G дипольный магнит***

Дипольные магниты используются в ускорителях частиц для научных и медицинских целей. Для изготовления дипольного магнита использовалась лента HTS-2G Superoh (сечение  $0,1 \times 12 \text{ мм}^2$ ). Минимальный критический ток ленты HTS-2G (77 К, автономное поле) составлял 400 А. В НИЦ «Курчатовский институт» - ИИЯФ лента HTS была обернута полиимидной лентой толщиной 20 мкм с перекрытием 50%.

На рисунке 10 показано поперечное сечение диполя HTS, а в таблице 4 перечислены основные параметры магнита. В верхней и нижней частях катушки из нержавеющей стали симметрично расположены две двойные обмотки типа рейстрек. Каждая обмотка состоит из двух слоев, изготовленных из отдельных кусков ленты HTS-2G, соединенных мостовыми паяными соединениями длиной 60 мм. Типичное сопротивление паяного соединения, измеренное при 77 К в собственном поле на коротких отрезках ленты, составляет 13 нОм. Количество витков в слое обмотки составляет 90, или 180 в каждой двойной обмотке, общее количество витков в магните составляет 360.

Магнитопровод состоит из четырех частей. Каждая часть изготовлена из стальных листов стали марки 2212 толщиной 0.5 мм с лаковой изоляцией толщиной 5 мкм. Листы магнитопровода сжимаются боковыми пластинами с помощью стержней из нержавеющей стали и закрепляются сваркой. Четыре ключа из нержавеющей стали используются для поперечного выравнивания деталей магнитопровода. Детали магнитопровода крепятся к катушке болтами, а затем свариваются вместе.

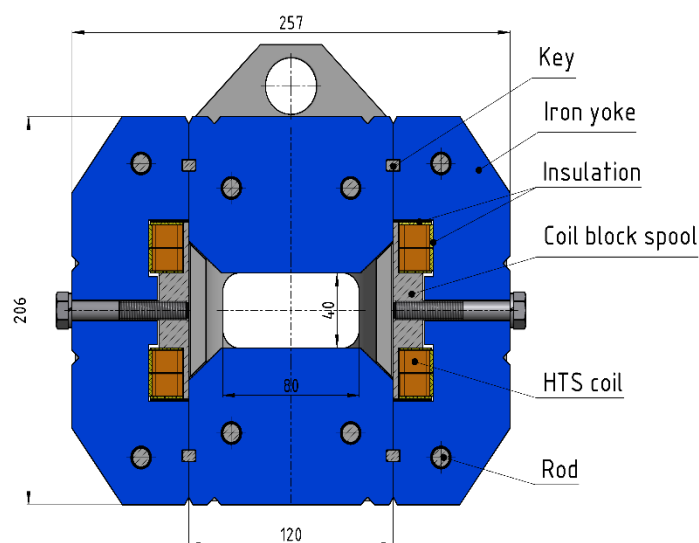


Рис. 9. Поперечное сечение ВТСП диполя.

Таблица 4. Основные характеристики ВТСП диполя.

Номинальное магнитное поле в апертуре	1 Тл
Рабочий ток	100 А
Число обмоток	2
Число слоев в каждой обмотке	2
Число витков в каждой обмотке	180
Полное число витков	360
Поперечное сечение ВТСП ленты без изоляции	$0.1 \times 12 \text{ мм}^2$
Минимальный критический ток (77К, собственное поле)	400 А
Толщина изоляции ВТСП ленты	40 мкм
Продольная длина магнита	425 мм
Длина прямой части обмотки	250 мм
Продольная длина магнитопровода	250 мм
Размеры апертуры	$40 \times 80 \text{ мм}^2$
Масса магнита	103 кг

ВТСП диполь был испытан в ванне с жидким азотом при 77 и 65 К. При 77 К ток обмотки достиг 110 и 113 А при критериях 1 мкВ/см и 10 мкВ/см соответственно. При 113 А центральное поле составляло 1.12 Тл. При 65 К ток обмотки достигал 226 и 228 А при критериях 1 мкВ/см и 10 мкВ/см соответственно. При 228 А центральное поле равно 1.66 Тл.

На рисунке 10 показаны измеренные и рассчитанные зависимости центрального поля дипольного магнита от рабочего тока и полевые зависимости критического тока ленты HTS-2G при 77, 65 и 5 К [8]. Вероятной причиной наблюдаемого расхождения между измеренными и расчетными значениями поля при токах выше 400 А является влияние механической обработки магнитопровода. На поверхности магнитопровода имеется слой толщиной около 0.1 мм с ухудшенными магнитными свойствами, созданный механической обработкой после сборки ярма. В средних и сильных магнитных полях поврежденный поверхностный слой насыщается раньше, чем остальная часть стали

ярма, что увеличивает эффективное расстояние между полюсами ярма и уменьшает центральное поле. При рабочем токе выше 400 А генерируемое магнитное поле линейно зависит от тока. Это происходит потому, что ярмо полностью насыщено, и поле увеличивается только за счет увеличения тока.

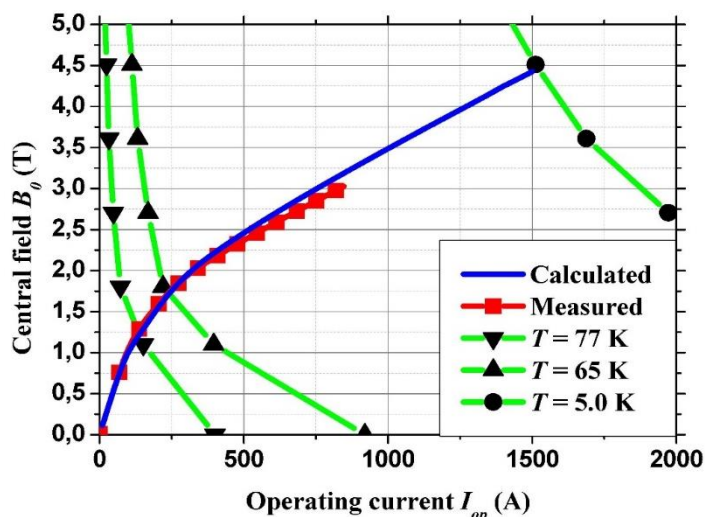


Рис. 10. Измеренные (красный) и рассчитанные (синий) зависимости центрального поля магнита от рабочего тока и полевые зависимости критического тока ленты HTS-2G (зеленый) при 77, 65 и 5 К.

В ванне с жидким гелием максимальный ток 847 А был ограничен источником питания, а центральное поле составляло 3.0 Тл. Для рабочего тока, равного критическому току образца короткой ленты в жидком гелии, магнитное поле в центре магнита, как ожидается, достигнет примерно 4.5 Тл.

На рисунке 11 показано распределение магнитного поля вдоль оси диполя при токе 30 А.

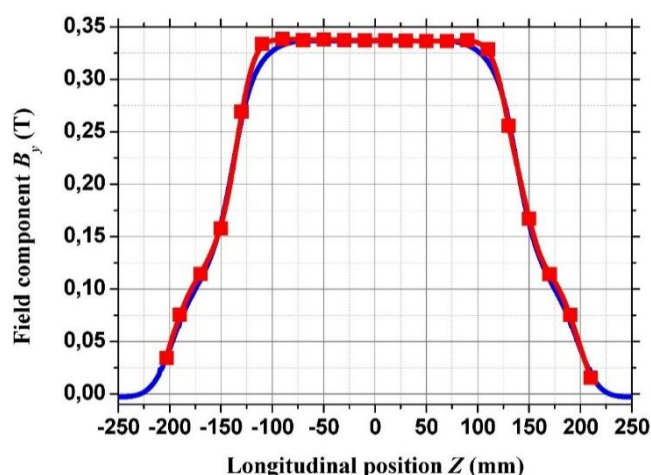


Рис. 11. Измеренное (символы) и рассчитанное (кривая) распределение магнитного поля вдоль оси магнита при токе 30 А.

### *Заключение*

Из ВТСП ленты второго поколения изготовлены полномасштабные рейстрекковые обмотки возбуждения ротора опытного образца сверхпроводящего синхронного электродвигателя мощностью 200 кВт (7 шт) и сверхпроводящего синхронного генератора мощностью 1 МВА (11 шт).

Критический ток обмоток при температуре 77 К и падении напряжения на обмотке 1 мкВ/см находился в интервале 46.3 – 53.0 А для СПСД и 39.4 – 43.9 А для СПСГ.

Значения критического тока при 1 мкВ/см практически совпали с пороговым значением тока, при котором начинался резкий рост падения напряжения (температуры) в нормальной зоне обмотки.

Для защиты при переходе в нормальное состояние обмоток СПСД и СПСГ рекомендуется не превышать пороговое значение тока и использовать для работы на постоянном токе источники с небольшим выходным напряжением.

Изготовлен и успешно испытан первый в России дипольный магнит с апертурой 80×40 мм из ВТСП ленты второго поколения производства компании «СуперОкс».

При температуре 77 К ток в обмотке ВТСП диполя составил 113 А при уровне напряжения на обмотке, соответствующего критерию 10 мкВ/см. При этом токе магнитное поле в центре диполя было равно 1.12 Тл.

При 65 К ток в обмотке ВТСП диполя составил 228 А при 10 мкВ/см. При этом токе магнитное поле в центре диполя было равно 1.66 Тл.



При испытаниях в жидком гелии был введен ток 847А (максимальный ток источника питания), при этом поле в центре магнита составило 3.03 Тл.

### Список литературы

- [1] W. Yuan et al., "Measurements and calculations of transport AC loss in second generation high temperature superconducting pancake coils", Journal of Applied Physics, 2011, 110 (11).
- [2] A. Friedman et al., "Critical Currents and AC Losses in YBCO Coils", Physics Proceeding 36 (2012) 1169 – 1174.
- [3] D. Dezhin, R. Ilyasov, S. Kozub, K. Kovalev, L. Verzhbitsky. "Synchronous Motor With Hts-2g Wires". Proceedings Of Eucas 2013, Genoa, Italy, September, 2013.
- [4] S. Kozub et al. "HTS Racetrack Coils for Electrical Machines". Proceedings of Cryogenics 2014, Prague, April, 2014.
- [5] D. Dezhin, K. Kovalev, L. Verzhbitsky, S. Kozub, V. Firsov. "Design and testing of 200 kW synchronous motor with 2G HTS field rotor coils". Proceedings of EUCAS 2015, Lyon, France, September, 2015.
- [6] K. Kovalev, V. Poltavets, R. Ilyasov, L. Verzhbitsky, S. Kozub. "1 MW HTS 2G Generator for Wind Turbines". Proceedings of EUCAS 2015, Lyon, France, September, 2015.
- [7] V.E. Sytnikov, V.S. Vysotsky1, I.P. Radchenko, N.V. Polyakova, "1G versus 2G – Comparison from the Practical Standpoint for HTS Power Cables Use", Journal of Physics: Conference Series 97 (2008) 012058 doi:10.1088/1742-6596/97/1/012058, 8th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2007).
- [8] *Results of Independent Measurements of SuperOx 2G HTS Wire in Digital Format 2012-2015*, available at <http://www.superox.ru/en/products/42-2G-HTS-tape/>

*Рукопись поступила 3 декабря 2021 г.*

И.В. Богданов, С.С. Козуб, Л.М. Ткаченко, В.И. Шувалов

Создание устройств на основе высокотемпературных сверхпроводников.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

---

Подписано к печати 07.12.2021                      Формат 60 × 84/16.      Цифровая печать.

Печ.л. 1,25.    Уч.– изд.л. 1,6.                      Тираж 60.    Заказ 1.                      Индекс 3649.

---

НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ  
142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, 1

www.ihep.ru; библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

Индекс 3649

---

ПРЕПРИНТ 2022-1,  
НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, 2022

---