

Обзор конструкций трансформаторов со сверхпроводящими обмотками

КРЮКОВ Д.О., МАНУСОВ В.З.

Приведен обзор трёх основных элементов конструкции существующих сверхпроводящих трансформаторов мощностью выше 25 кВА. Рассмотрены современные тенденции в данном направлении, указаны преимущества и недостатки сверхпроводящих трансформаторов по сравнению с традиционными. Обзор состоит из четырёх частей: краткого введения с указанием особенностей используемых в трансформаторах лент из высокотемпературных сверхпроводников, обзора используемых конструкций магнитопроводов «тёплой» и «холодной» конструкций; обзора различных типов обмоток и особенностей их изготовления; обзора используемых криостатов, необходимых для нормальной эксплуатации сверхпроводящих трансформаторов. В заключительной части статьи приводится таблица, объединяющая все, существующие на момент написания работы, экспериментальные разработки сверхпроводящих трансформаторов заявленной номинальной мощностью выше 25 кВА. Приведены основные параметры трансформаторов, год разработки, назначение и ссылка на оригинальное исследование.

К л ю ч е в ы е с л о в а: трансформатор, конструкция, высокотемпературная сверхпроводимость, криогенная техника

С момента открытия сверхпроводимости в 1911 г. до первого устройства, решающего задачи электроэнергетики, прошло много времени. Это время было использовано для преодоления технологических трудностей применения низкотемпературных сверхпроводников, ключевой из которых было содержание оборудования по ожижению гелия. Несмотря на огромные затраты первые электротехнические устройства всё-таки появились. И если говорить о трансформаторах с обмотками из низкотемпературных сверхпроводников (НТСП), то достаточно упомянуть приведенные в табл. 1.

С момента открытия явления высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) в 1986 г., в частности сверхпроводимости у керамических соединений иттрия или висмута, стало понятно, что крупномасштабные применения сверхпроводников для нужд электроэнергетики возможны только с

использованием ВТСП. Главным аргументом в пользу последнего утверждения является тот факт, что среда охлаждения – жидкий азот для ВТСП является дешёвым и простым в получении и хранении продуктом по сравнению с жидким гелием – средой охлаждения для НТСП (различие в цене за 1 кг может достигать 500 раз). Естественным образом количество исследований, связанных с использованием НТСП для создания основного электроэнергетического оборудования: кабелей, трансформаторов, генераторов, двигателей, резко сократилось. На рынке начали появляться ВТСП провода.

Между открытием ВТСП как явления и появлением ВТСП проводов на рынке в промышленных объемах прошло более пятнадцати лет. Связано это с технологической сложностью изготовления ВТСП проводов. К настоящему моменту принято выделять два поколения проводов. К первому поколению относятся провода, изготавливаемые по

Таблица 1

Год	Организация (страна)	Мощность, кВА	Основные характеристики	Напряжение на виток	Сверхпроводящий материал
1985	ГЕС-Alstom (Франция)	80	660/1040 В 142/77 А	2,14 В	NbTi
1988	Kyushu University (Япония)	72	1057/218 В 68А/332А	–	NbTi
1991	Toshiba (Япония)	30	100/100 В 300А/300А	–	NbTi
1991	Kito (Япония)	100	6600/210 В 15А/476А	4,57 В	Cu/NbTi
1992	Kyushu University (Япония)	1000	3300/220 В 303А/4545А	10 В	NbTi
1993	ABB (Швеция)	330	6000/400 В 56А/830А	7,9 В	NbTi
1995	Osaka University (Япония)	40	460/150 В 50А/200А	0,45 В	NbTi

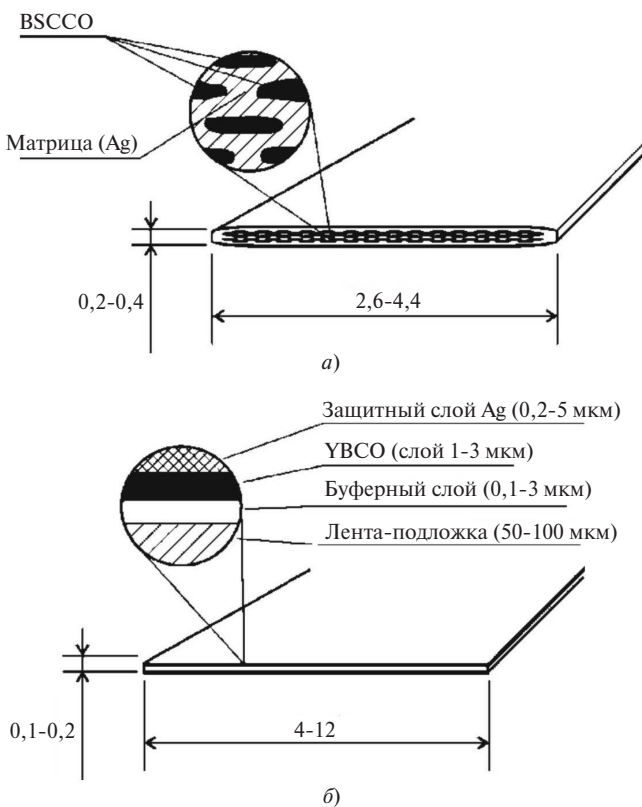


Рис. 1. Первое (а) и второе (б) [40] ВТСП поколения проводов

принципу «порошок в трубке», представляющие собой запрессованные сверхпроводящие керамические нити на основе висмута $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ (Bi-2212) с критической температурой $T_c = 80$ К или $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (Bi-2223) $T_c = 110$ К — в серебряную матрицу (рис. 1,а). Ко второму поколению принято относить многослойные провода, представляющие собой ленты, где на металлическую подложку напыляется слой сверхпроводящей керамики (например, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO-123) $T_c = 92$ К), которая затем покрывается защитным слоем из серебра (рис. 1,б). Иногда к классу ВТСП проводов относят провода на основе диборида магния (MgB_2 , $T_c \gg 39$ К), но крупных трансформаторов с использованием этого типа провода на данный момент изготовлено не было.

Разберём подробнее преимущества и недостатки ВТСП трансформаторов перед традиционными.

Преимущества. *Взрыво- и пожаробезопасность.* Это является преимуществом только перед маслонаполненными трансформаторами. Стоит отметить, что трансформаторы мощностью до нескольких МВА выполняются сухими с литой изоляцией. Также существует вариант исполнения трансформаторов с элегазовой изоляцией, которые также являются пожаробезопасными.

Меньшие масса и габариты изделия — о данном преимуществе говорится ввиду того, что допустимая плотность тока в сверхпроводящих проводах

значительно выше допустимой плотности тока в медных проводах (порядка 200 А/мм^2 против 15 А/мм^2 (амплитудные значения) для меди) [1]. Из этого следует, что ВТСП трансформаторы могут иметь большую удельную мощность. Однако следует учесть, что ВТСП трансформатор всегда должен иметь в своей конструкции систему охлаждения. Если система охлаждения работает в замкнутом цикле (без необходимости дозаправки азотом извне), то она может составлять существенную массу. Это означает, что на малых мощностях ВТСП трансформаторы теряют это своё преимущество перед традиционными. Однако при больших мощностях, когда вклад в «потери» за счёт системы охлаждения становится несущественным, преимущество в массовых показателях может оказаться на стороне ВТСП. Говоря о преимуществе в габаритах для трансформаторов большой мощности, следует помнить, что в этих трансформаторах, имеющих, как правило, более высокий класс напряжений, основные размеры будут определяться, в первую очередь, изоляционными расстояниями, которые в азотной среде, вероятно, будут больше.

Меньшие нагрузочные потери. Действительно потери в сверхпроводящих обмотках могут быть более чем в 20 раз меньше потерь в обычных трансформаторах [2, 3]. К сожалению, это далеко не всегда приводит к увеличению КПД трансформатора. Более подробно эта проблема будет рассмотрена далее.

Ограничение токов короткого замыкания. Единственное преимущество ВТСПТ, которое можно назвать бесспорным, — это свойство «автопереключения» обмоток на высокое сопротивление при возникновении в цепи сверхвысоких токов (например, при коротком замыкании). Но это преимущество при проектировании ВТСПТ, многие авторы упоминают лишь о такой возможности, но не демонстрируют её. Причиной тому могут быть, вероятно, риски повреждения ВТСПТ, связанные с демонстрацией этого эффекта.

Иногда авторы в список преимуществ ВТСПТ добавляют возможность работы в режиме перегрузки. Эта способность, в действительности, является всего лишь особенностью проекта конкретных трансформаторов, а именно в [4, 5] указана такая возможность. Среди других сомнительных преимуществ иногда называют нестарение изоляции обмоток из-за пребывания их в криосреде. На самом деле, речь идёт о тепловом нестарении изоляции, в то время как электрическое старение сохраняется. При должном охлаждении и грамотном режиме загрузки обычные трансформаторы также сохраняют высокую прочность изоляции на долгие годы.

Недостатки. Требования к системе охлаждения. Не только трансформаторы, но и каждое ВТСП электротехническое устройство должно непрерывно снабжаться хладагентом, который будет поддерживать температуру в камере содержания ВТСП проводов ниже критической (T_c). Это безусловно создаёт дополнительный риск отказа криооборудования при эксплуатации ВТСП устройства, ибо без охлаждения это устройство не может использоваться. В большинстве существующих ВТСП трансформаторов используется в качестве хладагента жидкий азот, электрическая прочность которого в невозмущённом (ламинарном) состоянии близка к электрической прочности трансформаторного масла [6], а цена за 1 кг сравнима или меньше стоимости масла.

Необходимость захлаживания. Каждый ввод в эксплуатацию ВТСП устройства большой мощности должен предваряться захлаживанием криокамеры. С увеличением габаритов устройства растёт и длительность процесса захлаживания. Так, для захлаживания трансформатора мощностью 1 МВА в [7] потребовалось два дня, а в [4] говорится о десяти днях для трансформатора той же мощности. Очевидно, что для более мощных трансформаторов затрачиваемое время будет расти пропорционально объёму устройства.

Хрупкость ВТСП проводов. Поскольку основным токонесущим элементом в ВТСП проводе является хрупкая керамика, то на различные манипуляции с проводами (изгиб, кручение, растяжение) накладываются существенные ограничения, которые делают затруднительным процесс изготовления ВТСП обмоток.

Часто к недостаткам ВТСП проводов относят так называемую «деградацию» ВТСП материала, т.е. ухудшение со временем токонесущих свойств ВТСП провода. Однако в [8] после длительной эксплуатации ВТСП трансформаторов в сети, а также в [9] после короткого замыкания «деградации» свойств выявлено не было.

В статье рассматривается современное состояние развития конструкции трансформаторов с высокотемпературными сверхпроводящими обмотками. Отдельное внимание уделяется проблеме реализации функции ограничения аварийных сверхтоков в таких трансформаторах. Учитывая значительный объём обработанного материала, в статье будут подробно рассматриваться три основных конструктивных блока ВТСПТ, а именно: криостат, обмотки и магнитопровод.

Магнитопровод. За долгие годы исследований ВТСП трансформаторов исследователями были опробованы самые различные типы конструкций магнитопроводов. Среди них, например, трансформаторы с воздушным магнитопроводом [10], частич-

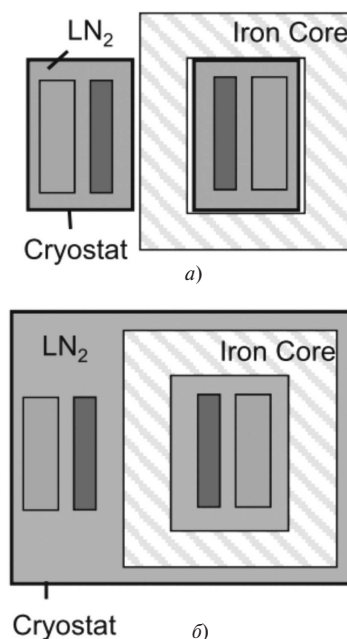


Рис. 2. Типы размещения магнитопроводов в ВТСПТ: *a* – вне криостата; *б* – внутри криостата

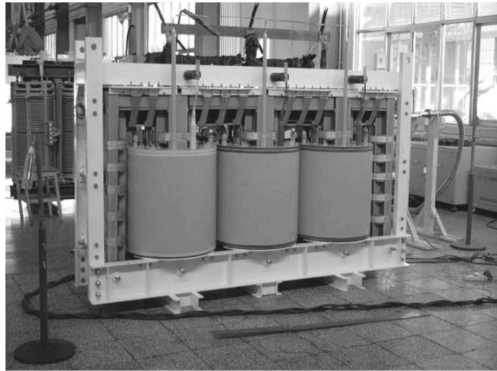
но-воздушным [11], тороидальным [12] и др. При этом выделяются также и способы размещения магнитопровода относительно охлаждающей среды (рис. 2): вне криостата (тёплый магнитопровод), внутри криостата (холодный магнитопровод).

Несмотря на большое разнообразие конструкций магнитопроводов, для силовых трёхфазных трансформаторов большой мощности исследователи отдают предпочтение классическому трёхстержневому или броневому магнитопроводу (трёхстержневой с двумя боковыми ярами, рис. 3,а). Для однофазных трансформаторов иногда также применяют броневой вариант исполнения рис. 3,б). В итоге получается, что эффективная конструкция ВТСП трансформатора большой мощности структурно не отличается от конструкции классического трансформатора. Вариации подвергаются лишь материал магнитопровода и его расположение относительно криосреды.

Преимущества тёплого магнитопровода. Меньшие затраты мощности на охлаждение системы: действительно, будучи помещённым в криосреду, магнитопровод создаёт дополнительную нагрузку на криосистему из-за потерь холостого хода, которые нагревают хладагент.

Недостатки тёплого магнитопровода. Более сложная конструкция криостата, поскольку стержни магнитопровода должны быть теплоизолированы от обмоток, криостат должен выполняться с отверстиями, что усложняет его конструкцию.

Большая индуктивность рассеяния из-за наличия слоя теплоизоляции между стержнем магнитопровода и обмоткой, что неминуемо приведёт к



а)



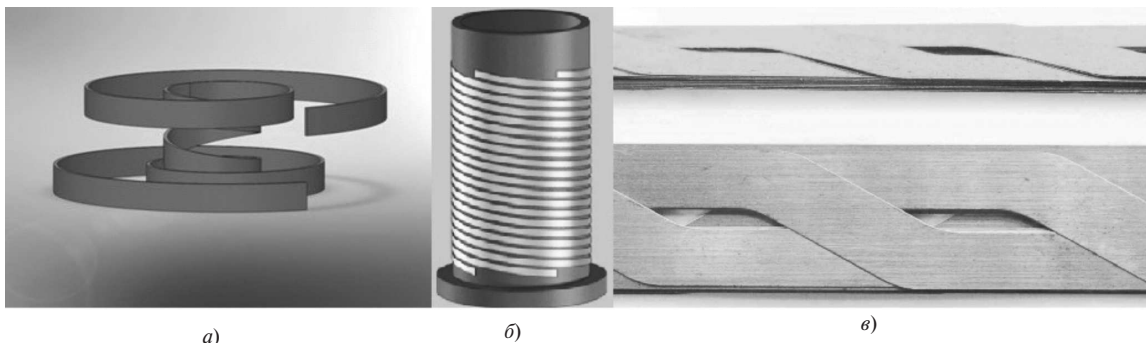
б)

Рис. 3. Виды бронестержневых магнитопроводов для ВТСП трансформаторов: а — трёхфазное исполнение [31]; б — однофазное исполнение [9]

ухудшению магнитной связи между ними, а следовательно, к снижению КПД.

Преимущества холодного магнитопровода. Простота криостата; меньшая индуктивность рассеяния.

Недостатки холодного магнитопровода. Большая нагрузка на охлаждающую систему. Добавим, что согласно [13] потери в электротехнической стали при низких температурах вырастают по сравнению с комнатной температурой. Однако этот эффект менее выражен в аморфных сталях, которые в настоящее время обладают самыми низкими потерями на гистерезис и вихревые токи, но при этом являются хрупкими с механической точки зрения, из-за чего не могут вынести большие механические нагрузки.



а)

б)

в)

Рис. 4. Принцип намотки двойной дисковой обмотки (а); принцип намотки многозаходной однослойной цилиндрической обмотки [16] (б); кабель Ребеля [22] (в)

Анализируя данные, собранные в табл. 2, можно видеть, что из 20 ВТСП трансформаторов (мощностью выше 25 кВА) 15 выполнены с тёплым магнитопроводом. Это может указывать на определённую тенденцию в конструировании ВТСП трансформаторов. Заметим также, что ни один из созданных трёхфазных трансформаторов не имел холодного магнитопровода.

Среди материалов, используемых для магнитопроводов, помимо упомянутой аморфной стали, использовались также стали марок EN-VM 111-35N — немецкий аналог отечественной холоднокатаной стали с ориентацией доменов по направлению прокатки, B27R085 — китайский аналог той же стали, 23ZH90 — японский аналог.

Таким образом, можно видеть, что для создания ВТСП трансформаторов в основном используется та же сталь, что для и обыкновенных, т.е. не предъявляются при этом какие-либо особые требования.

Обмотки. Как и в обыкновенных трансформаторах в ВТСПТ наиболее часто используются многослойные или однослойные цилиндрические обмотки. Также часто встречается конфигурация «double pancake coil», которая в отечественной литературе более известна как «двойная дисковая» или «двойная галетная обмотка» [20] (рис. 4,а). В настоящее время не существует однозначно установленного выбора конфигураций обмоток для ВТСП трансформатора. У каждого типа есть свои преимущества и недостатки.

Интересный сравнительный анализ двух конфигураций обмоток для одного и того же трансформатора проведён в [14, 15]. В этих работах указано, что основной недостаток галетных обмоток — большие потери на переменном токе. Основным недостатком цилиндрических обмоток является их низкая устойчивость к импульсным перенапряжениям. Среди прочих недостатков галетных обмоток можно выделить необходимость соединения отдельных галет с помощью пайки: в местах спайки сверхпроводящие свойства будут отсутствовать и как следствие — возникать потери [16]. Здесь же отмечены

Таблица 2

№ п/п, ссылка	Страна	Производство (компания/институт)	Год	Назначение/статус	Номинальная мощность, кВА	Число фаз	Напряжения ВН/НН, кВ
1, [8]	Швейцария	ABB, EDF, ASC	1996	Распределительные сети/Выведен из эксплуатации после 1 года работы	630	3 (DYn-11)	18,72/0,42
2, [23, 24]	Япония	Kuysu Uni., Fuji Electric, Sumitomo	1996	Демонстрационный	500	1	6,6/3,3
3, [25]	Германия	Siemens	1999	Демонстрационный	100	1	5,5/1,1
4, [4]	США	Waukesha	1999	Демонстрационный	1000	1	13,8/6,9
5, [5, 26]	США	Waukesha	2004	Демонстрационный	5000	3 (DY)	24,9/4,2
6, [27]	Япония	Fuji Electric	2001	Демонстрационный/Пройдены полевые испытания в сети в течение ~200 ч.	1000	1	22/6,9
7, [7]	Германия	Siemens	2001	Железные дороги	1000	1	25/1,4
8, [21, 28]	EU	CNRS	2003	Демонстрационный	41	1	2,05/0,41
9, [14, 15]	Корея	Seoul University	2004	Демонстрационный	1000	1	22,9/6,6
10, [29, 30]	Япония	Fuji Electric	2004	Железные дороги	3500	1	25/1,2/0,44
11, [31, 32]	Китай	IEE CAS	2005	Демонстрационный/ Проработал в сети до 2012 г.	630	3 (YYn0+7)	10,5/0,4
12, [33]	Япония	Nagoya University	2009	Демонстрационный	670 (2000)	1	12,7/3,81
13, [34]	Япония	Kuysu University	2010	Демонстрационный	400	1	6,9/2,3
14, [9]	Германия	KIT	2010	Демонстрационный	60	1	1/0,6
15, [22, 35]	Австралия	Callaghan Innovation	2013	Демонстрационный	1000	3 (DY)	11/0,415
16, [3]	Япония	Kuysu University	2014	Демонстрационный	2000	3(YY)	66/6,9
17, [36, 37]	Китай	IEE CAS	2014	Демонстрационный/В сети	1250	3 (YYn0)	10,5/0,4
18, [17]	Германия	KIT/ABB	2015	Демонстрационный	577	1	20/1
19, [2]	Россия	ЭНИН/ВНИИКП/МЕЛДИС	2016	Демонстрационный	1000	3 (DYn-11)	10/0,4
20, [38]	Китай	Shanghai Jiao Tong University	2017	Демонстрационный	330	1	10/0,23

Примечания: 1. Для быстрого ориентирования и поиска все номера таблицы сопровождаются ссылками на соответствующие публикации о трансформаторах.

2. Трансформаторы упорядочены по дате их первого упоминания в статьях либо по дате производства, указанной их авторами в публикации.

трудности, связанные с распараллеливанием провода обмотки. В связи с тем, что ВТСП провода имеют исчезающе низкое сопротивление на переменном токе, равномерное распределение тока между параллельными витками становится проблемой, которая может неизбежно привести к перегреву.

Одним из решений авторы считают использование многозаходных цилиндрических обмоток

(рис. 4,б) и приводят экспериментальные результаты, подтверждающие оправданность такой схемы. Другим возможным решением может являться транспонирование параллельных проводников [14]. В последнее время технология изготовления ВТСП лент позволила выполнять провода в виде, напоминающем «витую пару» (рис. 4,в), а именно, порезанные специальным образом ленты укладываются друг на друга, создавая единый транспонирован-

ный провод. В иностранной литературе она более известна под названием кабель Ребеля (Roebel cable). К сожалению, высокая стоимость данной технологии и большие расходы материала не позволили ей приобрести популярность у исследователей.

Как было отмечено ранее, сверхпроводники как 1-го, так и 2-го поколений теряют свои сверхпроводящие свойства в местах перегибов и изломов. В зависимости от конкретного провода варьируются также прочность на растяжение, допустимая температура нагрева, критический радиус изгиба, допустимое скручивание вокруг оси провода и др. Все эти ограничения создают трудности при создании и эксплуатации ВТСП обмоток.

Открытым также остаётся вопрос об электродинамических усилиях, действующих на обмотки в процессе короткого замыкания. С одной стороны, совершенно понятно, что относительно хрупкий материал ВТСП проводов не способен противостоять усилиям, создаваемым токами, которые способны разрушить обмотки из медного провода, с другой стороны, благодаря свойству токоограничения усилия, действующие на обмотки, должны многократно уменьшаться. Это поднимает вопрос не только о возможности предусмотреть токоограничивающие свойства в ВТСП трансформаторах, но и о необходимости учета данного аспекта.

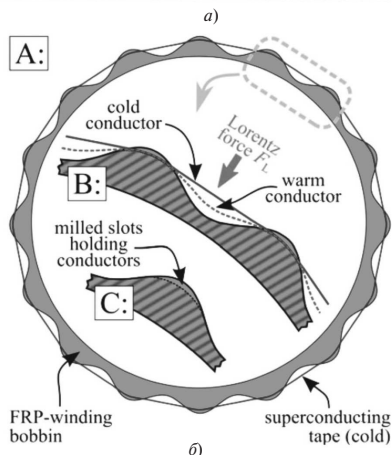
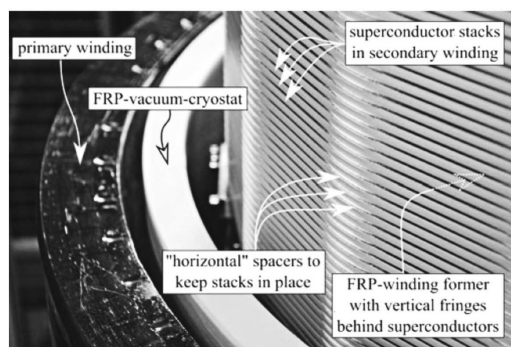


Рис. 5. Внешний вид ВТСП обмотки, намотанной на каркас из армированного стеклопластика (а); поперечный срез сверхпроводящей обмотки на каркасе [17] (б)

Интересный подход к смягчению динамических усилий в обмотке низкого напряжения предложен в [17]. Обмотка размещается в пазах каркаса сложной формы из армированного стеклопластика (рис. 5,а). Благодаря такой форме каркаса обмотки, во-первых, получают дополнительное охлаждение через вертикальные каналы. Во-вторых, поскольку во время короткого замыкания на обмотку начинают действовать радиальные силы, стремящиеся сжать обмотку, наличие вертикальных каналов создаёт возможность для обмоток вжаться в него и избежать деформации в случайном направлении (рис. 5,б (В)). После отключения короткого замыкания обмотки могут вернуться в исходное состояние без повреждений.

Использование армированного стеклопластика (Fiber reinforced plastic — или просто FRP) является общей тенденцией в построении ВТСП трансформаторов. Этот материал используют не только как намоточные каркасы для обмоток, но и для создания криостатов, о которых речь пойдет далее.

В качестве материала витковой изоляции обмоток авторами предпочитается каптон — плёночный материал из полиимида. Хорошая теплопроводность вместе с хорошими диэлектрическими качествами, а также доступность в виде тонких листов сделали каптон широко используемым материалом в криогенной технике, так как он обеспечивает электрическую изоляцию при низких (от $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$) и высоких температурах (до $400\text{ }^{\circ}\text{C}$), а также практически не подвержен тепловой деформации.

Отмеченная работа [17] вместе с [18] заслуживают внимания ещё и потому, что их авторы одни из немногих, кто делает серьёзные попытки доказать эффективность гибридной конструкции трансформатора с первичной обмоткой, выполненной из обычной меди, а вторичной — из ВТСП провода. Сложно, однако, представить себе такую конструкцию при более высоких мощностях, когда потребуется применять масляное охлаждение обмоток совместно с жидкоазотным.

Рассмотрим еще крайне важный аспект трансформаторных обмоток — потери на переменном токе. Как известно, в сверхпроводниках при неизменном во времени электромагнитном поле не возникает джоулевых потерь. При прикладывании же переменного во времени электрического поля потери возникают, хотя их значение на много порядков меньше, чем в обыкновенных проводниках. Существует три вида потерь в ВТСП проводах [19].

1. *Гистерезисные потери* обусловлены проникновением магнитного поля в толщу сверхпроводника, что провоцирует частичное возникновение омического сопротивления в толще. Этот вид потерь аналогичен потерям в ферромагнитных материалах в том смысле, что значение работы внешне-

го магнитного поля в обоих случаях равна значению площади петли гистерезиса, построенной в координатах намагничённости и напряжённости магнитного поля. Разница лишь в том, что в отличие от ферромагнетиков сверхпроводники диамагнитны по своей природе, т.е. имеют намагничённость, направленную против действующего поля.

2. *Кооперативные потери* – перетекание тока по матрице между сверхпроводящими волокнами. Данный вид потерь особенно характерен для ВТСП первого поколения, где множество сверхпроводящих волокон помещены в матрицу из материала с конечным омическим сопротивлением. Ввиду некоторой неравномерности электрического поля внутри ВТСП провода, а также наличия омического сопротивления часть тока в течение цикла осциллирующего поля может перетекать от одних ВТСП волокон к другим, что и вызывает потери. Заметим, что в случае с ВТСП проводами 2-го поколения этими потерями можно пренебречь.

3. *Вихревые токи* – переменный электрический ток в сверхпроводнике непременно индуцирует вихревые токи в материалах, окружающих его. Для ВТСП 1-го поколения это, например, матрица из серебра. Для ВТСП 2-го поколения – медная оболочка и подложка из обычного металла.

Сумма этих трёх видов потерь даёт величину, именуемую потерями в обмотках. Измерение этих потерь напрямую с помощью амперметра и вольтметра представляется крайне трудной задачей, приводящей часто к ошибкам, поскольку объём этих потерь на несколько порядков ниже измеряемых на вводах трансформатора мощностей. Кроме того, трудно выделить среди общих потерь, которые включают также потери в токовводах и стенках бака, потери в обмотках. Наиболее точно измерить эти потери можно с помощью калориметрического метода, т.е. посредством определения массы испаряемого жидкого азота в процессе работы обмотки. Существуют также численные методы расчёта потерь, изложенные вместе с другими методиками измерения, например [19].

Среди рассматриваемых (в табл. 2) ВТСП трансформаторов доля потерь мощности в обмотках варьируется от 0,001 до 0,17% полной мощности трансформатора. Среднее же значение потерь среди рассматриваемых 20 устройств равно 0,05%. Интерес к измерению или вычислению этих потерь обусловлен проблемой стабилизации сверхпроводника при протекании рабочих токов нормального режима и токов поставарийного режима. Данный вопрос выходит за пределы обсуждения этой статьи.

Потери в обмотках составляют лишь часть полных, включающих также потери в токовводах, стенках бака (если таковые выполнены из проводя-



Рис. 6. Структура потерь энергии на годовом интервале в обычном трансформаторе и ВТСП трансформаторе (кооперативные потери отсутствуют в предположении ВТСП лент 2-го поколения); соотношение потерь энергии рассчитано для трансформатора номинальной мощностью 63 МВА и напряжением обмоток 21/9,09 кВ [39]

щего материала) и несущих конструкциях трансформатора. Их принято называть «потерями короткого замыкания» $P_{КЗ}$ (именно они и представлены в табл. 2 и 3). Полная структура потерь будет варьироваться в конкретных ВТСП трансформаторах. Для примера приведена на рис. 6 структура потерь энергии на годовом интервале, описанная в [39].

В качестве мероприятий по снижению потерь в обмотках применяются различные подходы. Помимо отказа от использования дисковых обмоток и кабеля Ребеля, интересный способ снижения потерь был предложен авторами [3]. Суть его – в разделении ВТСП ленты на несколько частей лазером вдоль. Эффект от такого разделения эквивалентен эффекту от шихтовки магнитопровода трансформатора. На рис. 7 представлена схема такого разделения. Можно видеть, что разделению подвергаются все слои, кроме подложки. Также представлены зависимости потерь на переменном токе (рис. 7,б) от амплитуды магнитного поля при различных температурах хладагента. Можно видеть, что по сравне-

Таблица 3

№ п/п, ссылка	Страна	ВТСП провод	Тип/материал магнитопровода*	Тип обмотки**	Тип криостата***	Потери, кВт		Напряжение КЗ, %
						х.х,	КЗ	
1, [8]	Швейцария	Bi-2223	Т / ЭС	МЦ	Криостат из эпоксидной смолы с вакуумизированной прослойкой	2,1	0,337	4,6
2, [23, 24]	Япония	Bi-2223	Т / ЭС	МЦ	GFRP	2,289	1,28	0,67
3, [25]	Германия	Bi-2223	Т	ВН-Г / НН-ОЦ	GFRP	0,403	0,021	0,87
4, [4]	США	Bi-2212	Х	–	КНС	2,8	–	1,68
5, [5,26]	США	Bi-2223	Т	–	КНС	–	–	–
6, [27]	Япония	Bi-2223	Т	МЦ	GFRP	3,2	0,21	5
7, [7]	Германия	Bi-2223	Х	ВН-МЦ / НН-ОЦ	КНС	0,734	0,38	24,3
8, [21, 28]	EU	P-Bi-2223/S- YBCO	Х / ЭС	МЦ	КНС	0,05	0,004	0,75
9, [14, 15]	Корея	Bi-2223/AM SC	Т	ДГ	GFRP	2,65	0,4	4,67
10, [29, 30]	Япония	Bi-2223	Т	ВН-МЦ / НН-ОЦ	GFRP	0,71	6,2	20
11, [31, 32]	Китай	Bi-2223	Т / АС	ВН-ОЦ / НН-ДГ	GFRP	1,09	0,175	2,5
12, [33]	Япония	P-Bi-2223/ S-YBCO	Х	МЦ	Д	0,41	–	6
13, [34]	Япония	YBCO	Т	МЦ	GFRP	–	–	10
14. [9]	Германия	P-Cu/S- YBCO	Х / ЭС	МЦ	Д	–	–	1,58
15, [22, 35]	Австралия	YBCO	Т	ВН-ДГ / НН-ОЦ	Криостат из нержавеющей стали с вакуумизированными стенками	1,2	0,36	5,95
16, [3]	Япония	GdBCO	Т	МЦ	GFRP	7,92	0,026	3
17, [36, 37]	Китай	Bi-2223	Т / ЭС	ВН-МЦ / НН-ДГ	GFRP	2,319	0,143	5,6
18, [17]	Германия	P-Cu/S- YBCO	Т / ЭС	ВН-МЦ / НН-ОЦ	GFRP	3,82	ВН - 0,885/ НН - 0,05	2,96
19, [2]	Россия	YBCO	Т / АС	ВН-ДГ / НН-ОЦ	GFRP	0,68	0,45	3,3
20, [38]	Китай	GdBCO	Т / ЭС	ВН-МЦ / НН-ДГ	Криостат из эпоксидной смолы	1,331	0,344	2,25

Примечания: Под потерями КЗ следует понимать полные потери КЗ, включающие потери в токовводах, обмотках и несущих конструкциях.

*Т – тёплый магнитопровод; Х – холодный магнитопровод; ЭС – магнитопровод из электротехнической стали; АС – магнитопровод из аморфной стали;

**МЦ – многослойная цилиндрическая; ОЦ – однослойная цилиндрическая; Г – галетная; ДГ – двойная галетная; ВН – обмотка высокого напряжения; НН – низкого напряжения;

***GFRP – криостат из армированного стекловолокна (Grain fiber reinforced plastic); КНС – заполненный хладагентом контейнер из нержавеющей стали внутри вакуумизированного бака; Д – трансформатор целиком погружен в сосуд Дьюара.

нию с неразделёнными лентами потери в разделённых были снижены почти в 5 раз при индукции,

близкой к рабочей индукции немагнитного зазора трансформатора (0,1–0,2 Тл).

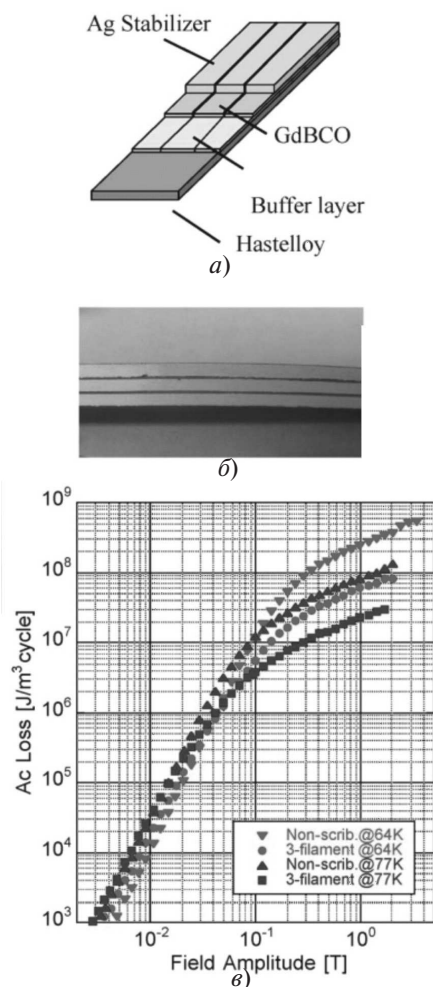


Рис. 7. Схема разделенной ВТСП ленты (а) и зависимость потерь от амплитуды индукции поля на переменном токе в разделенных и неразделенных лентах при различных температурах [3] (б)

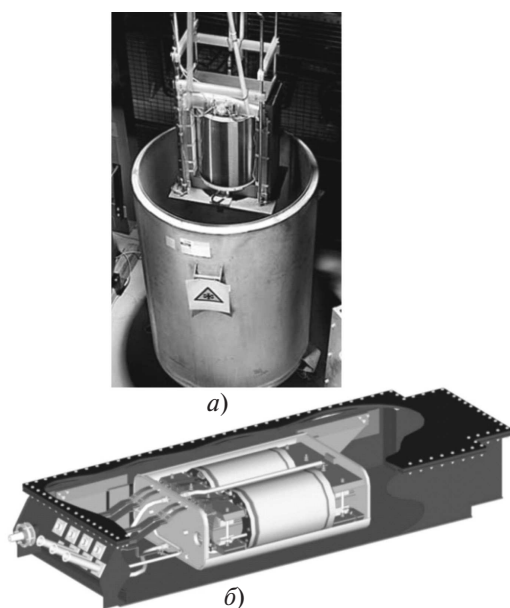


Рис. 8. Криостаты для ВТСПТ с холодным магнитопроводом: а – криостат с двойной вакуумизированной стенкой [9]; б – криостат типа «контейнер в контейнере» [7]

Криостат. Криостат любого ВТСП устройства должен быть способен выполнять две задачи: во-первых, длительно удерживать большую массу жидкости вместе с обмотками при наличии высокого градиента температур между окружающей средой и объемом криостата; во-вторых, обеспечивать минимально возможный теплообмен жидкости с окружающей средой. Качество выполнения теплоизоляции определяет эффективность всей системы охлаждения и, как следствие, КПД трансформатора, значение которого для справедливости должно включать затраты энергии на холодильную установку. Достаточно сказать, что каждый ватт теплопритоков при температуре хладагента, равной 77К, требует 10–20 Вт холодильной мощности при температуре 300 К [6].

В случае выбора конструкции ВТСП трансформатора с холодным магнитопроводом две отмеченные ранее задачи может решить сосуд из нержавеющей стали с двойной вакуумизированной стенкой по типу сосуда Дьюара (рис. 8,а), как в работах [9, 21]. Более надёжным, но технологически более сложным способом является «контейнер в контейнере»: внутри внешнего вакуумизированного бака из нержавеющей стали располагается криостат, заполненный жидким азотом (рис. 8,б), что было представлено в [4, 7].

В случае выбора конструкции трансформатора с теплым магнитопроводом, помимо перечисленного, криостат должен быть выполнен из электроизоляционного материала или, по крайней мере, та его часть, которая обеспечивает теплоизоляцию

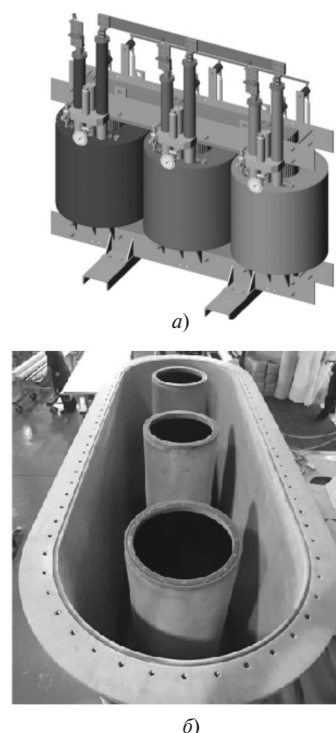


Рис. 9. Криостаты для ВТСПТ с теплым магнитопроводом [36]: а – фазное исполнение; б – общий криостат [3]

магнитопровода от обмоток. Кроме того, слой теплоизоляции не может быть сколь угодно толстым, поскольку это приводит к увеличению индуктивности рассеяния и уменьшению тем самым КПД трансформатора. Анализ работ показывает наиболее предпочтительным выбор криостата из армированного стеклопластика (часто встречается под названием G10) – этот тип встречается в большинстве работ по тёплым ВТСП трансформаторам.

Среди криостатов трехфазных тёплых ВТСПТ существует разделение относительно формы криостата. Вопрос заключается в том, делать ли отдельный криостат для каждой фазы (рис. 9,а) или общий для всех трёх фаз (рис. 9,б). В первом случае, очевидно, снижается объём заполняемого хладагентом пространства, но увеличивается число каналов подачи хладагента и становится невозможным соединять проводники внутри криостата (например, по схеме «звезда»), из-за чего требуются дополнительные токовводы, ведущие к увеличению теплопритоков. Во втором случае увеличивается сложность изготовления криостата, но упрощается система охлаждения [22].

Заключение. Проанализированы результаты работы многих команд конструкторов и исследователей, на счету которых 20 созданных ВТСП трансформаторов в диапазоне мощностей от 25 до 5000 кВА. Безусловно были и другие трансформаторы меньшей мощности, не вошедшие в обзор, но в отдельных случаях заслуживающие не меньшего внимания.

По своей топологии ВТСП трансформаторы остаются схожими с трансформаторами традиционной конструкции и, строго говоря, принципиально не отличаются от них по способу выполнения своей основной функции – трансформации значений токов и напряжений. Отличия же во внутренней структуре и необходимости постоянного криообеспечения делают ВТСП трансформаторы поистине новым типом электрооборудования, с особенностями которого необходимо считаться.

Магнитопроводы для большинства ВТСП трансформаторов остаются неизменными по сравнению с магнитопроводами обычных трансформаторов. Усилия исследователей в этой части состоят лишь в опробовании новых типов сталей, что является общей тенденцией. Без ответа лишь остаётся вопрос, какое исполнение магнитопровода эффективней «тёплое» или «холодное». Тенденции указывают на первый вариант.

Обмотки ВТСП трансформаторов представляют центральную и наиболее многообразно развивающуюся его часть. Успех применения ВТСП трансформаторов напрямую зависит от качества и цены

на ВТСП провода, из которых и делаются обмотки. В настоящее время общими тенденциями являются стремление к снижению потерь в обмотках и устойчивость их при выходе из сверхпроводящего состояния. Не без внимания должны оставаться и вопросы механической устойчивости обмоток, а также качество изоляции.

Криостат ВТСП трансформатора должен иметь наименьшие тепловые потери при соответствующей стоимости. Хотя в данном направлении намечалась определенная устойчивая тенденция, заключающаяся в использовании армированного стеклопластика (grain-fiber reinforced plastic (GFRP)) в качестве материала для криостата.

Будущие ВТСП трансформаторы должны при необходимости выполнять функции ограничения токов короткого замыкания. Лишь эффективное выполнение этой функции в совокупности с типичными функциями, по мнению авторов, может сделать ВТСП трансформатор востребованным и незаменимым на рынке электрооборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sissimatos E. Technik und Einsatz von hochtemperatur-supraleitenden Leistungstransformatoren. Dissertation. Universität Hannover, 2005.
2. Волков Э.П., Джафаров Э.А., Флейшман Л.С., Высоцкий В.С., Суконкин В.В. и др. Первый в России ВТСП трансформатор 1 МВА, 10/0, 4 кВ. – Изв. Российской академии наук. Энергетика, 2016, №. 5, с. 45–56.
3. Iwakuma M., Kizen Sakaki, Akira Tomioka, Takeji Miyayama, Masayuki Konno. Development of a 3 ϕ 66/6.9 kV-2 MVA REBCO Superconducting Transformer. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2015, vol. 3, No. 25, pp. 1–6.
4. Schwenler S.W., Monnell B.W., Demko J.A., Fadnek A., Hsu J., List F.A. Performance of a 1 MVA HTS demonstration transformer. – IEEE transactions on applied superconductivity, 1999, vol. 9, No. 2, pp. 680–684.
5. Weber C.S., Reis C.T., Haselton D.W. Design and operational testing of a 5/10-MVA HTS utility power transformer. – IEEE transactions on applied superconductivity, 2005, vol. 15, No. 2, pp. 2210–2213.
6. Малков М.П., Данилов И.Б., Зельдович А.Г., Фрадков А.Б. Справочник по физико-техническим основам криогеники/Под ред. М.П. Малкова. 3-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1985, 432 с.
7. Schlosser R. Schlosser R., Schmidt H., Leghissio M., Meinert M. Development of high-temperature superconducting transformers for railway applications. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2003, vol. 13, No. 2, pp. 2325–2330.
8. Zueger H. 630 kVA high temperature superconducting transformer. – Cryogenics, 1998, vol. 38, No. 11, pp. 1169–1172.
9. Berger A., Noe M., Kudymow A. Test results of 60 kVA current limiting transformer with full recovery under load. – IEEE transactions on applied superconductivity, 2011, vol. 21, №. 3, pp. 1384–1387.
10. Song Meng, Yuejun Tang, Nan Chen, Zhi Li., Yusheng Zhou. Theoretical analysis and experiment research of high temperature superconducting air-core transformer. – Intern. Conf. on IEEE «Electrical Machines and Systems», 2008, pp. 4394–4397.

11. **Hu D., Sheng J., Ma J., Yao L., Li Z.Y., Hong Z.** Characteristic tests and electromagnetic analysis of an HTS partial core transformer. — IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, vol. 26, No. 4, pp. 1–5.
12. **Pérez B.** AC losses in a toroidal superconducting transformer. — IEEE transactions on applied superconductivity, 2003, vol. 13, No. 2, pp. 2341–2343.
13. **Gniewek J.J., Ploge E.** Cryogenic behavior of selected magnetic materials. — Journal of research of the NBS. Engineering and Instrumentation, 1965, vol. 69, No. 3, pp. 225–236.
14. **Kim S.H.** Characteristic tests of a 1 MVA single phase HTS transformer with concentrically arranged windings. — IEEE transactions on applied superconductivity, 2005, vol. 15, No. 2, pp. 2214–2217.
15. **Kim W.S.** Characteristic test of a 1 MVA single phase HTS transformer with pancake windings. — IEEE transactions on applied superconductivity, 2004, vol. 14, No. 2, pp. 904–907.
16. **Vysotsky V.S., Fetisov S.S., Zubko V.V., Zanegin S.Yu., Nosov A.A.** Development and test results of HTS windings for superconducting transformer with 1 MVA rated power. — IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2017, vol. 27, No. 4, pp. 1–5.
17. **Hellmann S.** Manufacturing of a 1 MVA-Class superconducting fault current limiting transformer with recovery-under-load capabilities. — IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2017, vol. 27, No. 4, pp. 1–5.
18. **Berger A., Noe M., Kudymow A.** Test results of 60 kVA current limiting transformer with full recovery under load. — IEEE transactions on applied superconductivity, 2011, vol. 21, No. 3, pp. 1384–1387.
19. **Уилсон М.** Сверхпроводящие магниты/Пер. с англ. М.: Мир, 1985, 405 p.
20. **Тихомиров П.М.** Расчет трансформаторов. М.: Энергоатомиздат, 1986, vol. 528.
21. **Tixador P., Donnier-Valentin G., Maher E.** Design and construction of a 41 kVA Bi/Y transformer. — IEEE transactions on applied superconductivity, 2003, vol. 13, No. 2, pp. 2331–2336.
22. **Glasson N., Staines M., Buckley R., Pannu M.** Development of a 1 MVA 3-phase superconducting transformer using YBCO Roebel cable. — IEEE transactions on Applied Superconductivity, 2011, vol. 21, No. 3, pp. 1393–1396.
23. **Funaki K.** Preliminary tests of a 500 kVA-class oxide superconducting transformer cooled by subcooled nitrogen. — IEEE transactions on applied superconductivity, 1997, vol. 7, No. 2, pp. 824–827.
24. **Funaki K.** Development of a 500kVA-class oxide-superconducting power transformer operated at liquid-nitrogen temperature. — TEION KOGAKU: Journal of Cryogenics and Superconductivity Society of Japan, 1998, vol. 33, No. 6, pp. 371–381.
25. **Kummeth P.** Development and test of a 100 kVA superconducting transformer operated at 77 K. — Superconductor Science and Technology, 2000, vol. 13, №. 5, pp. 503.
26. **Schwenterly S.W.** Design and operating performance of cryocooled helium thermosiphon loops for HTS transformers. — AIP Conf. Proc, 2004, vol. 710, No. 1, pp. 839–848.
27. **Funaki K.** Development of a 22kV/6.9 kV single-phase model for a 3MVA HTS transformer cooled by liquid. — Applied Superconductivity Conf. (ASC2000).
28. **Tixador P.** Tests of a Bi/Y transformer. — IEEE transactions on applied superconductivity, 2005, vol. 15, No. 2, pp. 1847–1850.
29. **Kamijo H.** Tests of superconducting traction transformer for railway rolling stock. — IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2007, vol. 17, No. 2, pp. 1927–1930.
30. **Kamijo H.** Fabrication of superconducting traction transformer for railway rolling stock. — Journal of Physics: Conf. Series. — IOP Publishing, 2006, vol. 43, No. 1, p. 841.
31. **Wang Y.** Development of a 630 kVA three-phase HTS transformer with amorphous alloy cores. — IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2007, vol. 17, No. 2, pp. 2051–2054.
32. **Xiao L., Shaotao Dai, Liangzen Li, Linye Zhang.** Development of the world's first HTS power substation. — IEEE Transactions on applied superconductivity, 2012, vol. 22, No. 3.
33. **Kotari M.** Development of 2 MVA class superconducting fault current limiting transformer (SFCLT) with YBCO coated conductors. — Journal of Physics: Conf. Series. — IOP Publishing, 2010, vol. 234, No. 3.
34. **Uhei Ohtsubo., Masataka Iwakuma, Stiki Sato, Kizen Sakaki, Akira Tomioka.** Development of REBCO superconducting transformers with a current limiting function—Fabrication and tests of 6.9 kV-400 kVA transformers. — IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2015, vol. 25, No. 3, pp. 1–5.
35. **Glasson N.** Test results and conclusions from a 1 MVA superconducting transformer featuring 2G HTS Roebel cable. — IEEE Trans. Appl. Supercond, 2017, vol. 27, №. 4.
36. **Dai S.** Development of a 1250-kVA superconducting transformer and its demonstration at the superconducting substation. — IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, vol. 26, No. 1, pp. 1–7.
37. **Qiu Q.** Winding design and electromagnetic analysis for a 1250-kVA HTS transformer. — IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2015, vol. 25, No. 1, pp. 1–7.
38. **Hu D.** Development of a single-phase 330kVA HTS transformer using GdBCO tapes. — Physica C: Superconductivity and its applications, 2017, vol. 539, pp. 8–12.
39. **Berger A.** Comparison of the efficiency of superconducting and conventional transformers. — Journal of Physics: Conf. Series. — IOP Publishing, 2010, vol. 234, No. 3.
40. **Александров Н.В.** Исследование влияния сверхпроводниковых трансформаторов на режимы электроэнергетических систем: Дис. ... канд. тех. наук. Новосибирск, НГТУ, 24.04.2014.

[27.02.2019]

А в т о р ы: Крюков Дмитрий Олегович — магистрант кафедры систем электроснабжения предприятий Новосибирского государственного технического университета (НГТУ).

Манусов Вадим Зиновьевич — доктор техн. наук, профессор кафедры систем электроснабжения предприятий НГТУ, диссертацию защитил в 1985 г.

DOI:10.24160/0013-5380-2019-8-4-16

Elektrichestvo, 2019, No. 8, pp. 4–16

A Review of Constructions of Transformers with Superconducting Windings

KRYUKOV Dmitry O. (Novosibirsk State Technical University (NSTU), Novosibirsk, Russia) — Master student of Industrial Power Supply Systems Dept.

MANUSOV Vadim Z. (*NSTU, Novosibirsk, Russia*) – *Professor of Industrial Power Supply Systems Dept., Dr. Sci. (Eng.)*

Three key design components of existing superconducting transformers with capacities above 25 kVA are reviewed. Modern tendencies existing in this field are considered, and the advantages and drawbacks of superconducting transformers in comparison with conventional ones are pointed out. The review contains four parts: a brief introduction with outlining the specific features of high-temperature superconductor tapes used in transformers, a review of the used “warm” and “cold” magnetic core designs, a review of various types of windings and specific features connected with their manufacture, and a review of the used cryostats required for normal operation of superconducting transformers. The final part of the article contains a table summarizing all experimental developments of superconducting transformers with the announced rated capacity above 25 kVA existing by the article writing time. The basic parameters of the transformers, the development year, the purpose, and the reference to the original investigation are given.

Key words: *transformer, high-temperature superconductivity, transformer design, cryogenic engineering*

REFERENCES

1. Sissimatos E. Technik und Einsatz von Hochtemperatur-supraleitenden Leistungstransformatoren. Dissertation. Universität Hannover, 2005. 2016, No. 5, pp. 45–56.
2. Volkov E.P., Dzhafarov E.A., Flishman L.S., Visotskiy V.S., Sukonkin V.V. et al. Izv. Rossiiskoi Akademii Nauk. Energetika – in Russ. (News of RAS. Energy), 2016, No. 5, pp. 45–56.
3. Iwakuma M., Kizen Sakaki, Akira Tomioka, Takeji Miyayama, Masayuki Konno. Development of a 3ϕ 66/6.9 kV-2 MVA REBCO Superconducting Transformer. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2015, vol. 3, No. 25, pp. 1–6.
4. Schwenterly S.W., Monnell B.W., Demko J.A., Fadnek A., Hsu J., List F.A. Performance of a 1 MVA HTS demonstration transformer. – IEEE transactions on applied superconductivity, 1999, vol. 9, No. 2, pp. 680–684.
5. Weber C.S., Reis C.T., Haselton D.W. Design and operational testing of a 5/10-MVA HTS utility power transformer. – IEEE transactions on applied superconductivity, 2005, vol. 15, No. 2, pp. 2210–2213.
6. Malkov M.P., Danilov I.B., Zel'dovich A.G., Fradkov A.B. *Spravochnik po fiziko-tekhnicheskim osnovam kriogeniki* (Reference book on physics and technical bases of cryogenics)/Edit. by M.P. Malkov. 3rd Edit. Moscow, Energoatomizdat, 1985, 432 p.
7. Schlosser R. Schlosser R., Schmidt H., Leghissio M., Meinert M. Development of high-temperature superconducting transformers for railway applications. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2003, vol. 13, No. 2, pp. 2325–2330.
8. Zueger H. 630 kVA high temperature superconducting transformer. – Cryogenics, 1998, vol. 38, No. 11, pp. 1169–1172.
9. Berger A., Noe M., Kudymow A. Test results of 60 kVA current limiting transformer with full recovery under load. – IEEE transactions on applied superconductivity, 2011, vol. 21, No. 3, pp. 1384–1387.
10. Song Meng, Yuejun Tang, Nan Chen, Zhi Li., Yusheng Zhou. Theoretical analysis and experiment research of high temperature superconducting air-core transformer. – Intern. Conf. on IEEE, Electrical Machines and Systems, 2008, pp. 4394–4397.
11. Hu D., Sheng J., Ma J., Yao L., Li Z.Y., Hong Z. Characteristic tests and electromagnetic analysis of an HTS partial core transformer. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, vol. 26, No. 4, pp. 1–5.
12. Pérez B. AC losses in a toroidal superconducting transformer. – IEEE transactions on applied superconductivity, 2003, vol. 13, No. 2, pp. 2341–2343.
13. Gniewek J.J., Ploge E. Cryogenic behavior of selected magnetic materials. – Journal of research of the NBS. Engineering and Instrumentation, 1965, vol. 69, No. 3, pp. 225–236.
14. Kim S.H. Characteristic tests of a 1 MVA single phase HTS transformer with concentrically arranged windings. – IEEE transactions on applied superconductivity, 2005, vol. 15, No. 2, pp. 2214–2217.
15. Kim W.S. Characteristic test of a 1 MVA single phase HTS transformer with pancake windings. – IEEE transactions on applied superconductivity, 2004, vol. 14, No. 2, pp. 904–907.
16. Vysotsky V.S., Fetisov S.S., Zubko V.V., Zanezin S.Yu., Nosov A.A. Development and test results of HTS windings for superconducting transformer with 1 MVA rated power. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2017, vol. 27, No. 4, pp. 1–5.
17. Hellmann S. Manufacturing of a 1 MVA-Class superconducting fault current limiting transformer with recovery-under-load capabilities. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2017, vol. 27, No. 4, pp. 1–5.
18. Berger A., Noe M., Kudymow A. Test results of 60 kVA current limiting transformer with full recovery under load. – IEEE transactions on applied superconductivity, 2011, vol. 21, No. 3, pp. 1384–1387.
19. Wilson M. *Sverkhprovodyashchiye magnity* (Superconductor magnets)/ Transl. from Eng. Moscow, Mir, 1985, 405 p.
20. Tikhomirov P.M. *Raschet transformatorov* (Calculation of transformers). Moscow, Energoatomizdat, 1986, vol. 528.
21. Tixador P., Donnier-Valentin G., Maher E. Design and construction of a 41 kVA Bi/Y transformer. – IEEE transactions on applied superconductivity, 2003, vol. 13, No. 2, pp. 2331–2336.
22. Glasson N., Staines M., Buckley R., Pannu M. Development of a 1 MVA 3-phase superconducting transformer using YBCO Roebel cable. – IEEE transactions on Applied Superconductivity, 2011, vol. 21, No. 3, pp. 1393–1396.
23. Funaki K. Preliminary tests of a 500 kVA-class oxide superconducting transformer cooled by subcooled nitrogen. – IEEE transactions on applied superconductivity, 1997, vol. 7, No. 2, pp. 824–827.
24. Funaki K. Development of a 500kVA-class oxide-superconducting power transformer operated at liquid-nitrogen temperature. – TEION KOGAKU: Journal of Cryogenics and Superconductivity Society of Japan, 1998, vol. 33, No. 6, pp. 371–381.
25. Kummeth P. Development and test of a 100 kVA superconducting transformer operated at 77 K. – Superconductor Science and Technology, 2000, vol. 13, No. 5, pp. 503.
26. Schwenterly S.W. Design and operating performance of cryocooled helium thermosiphon loops for HTS transformers. – AIP Conf. Proc, 2004, vol. 710, No. 1, pp. 839–848.
27. Funaki K. Development of a 22kV/6.9 kV single-phase model for a 3MVA HTS transformer cooled by liquid. – Applied Superconductivity Conf. (ASC2000).

28. **Tixador P.** Tests of a Bi/Y transformer. — IEEE transactions on applied superconductivity, 2005, vol. 15, No. 2, pp. 1847—1850.
29. **Kamijo H.** Tests of superconducting traction transformer for railway rolling stock. — IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2007, vol. 17, No. 2, pp. 1927—1930.
30. **Kamijo H.** Fabrication of superconducting traction transformer for railway rolling stock. — Journal of Physics: Conf. Series. — IOP Publishing, 2006, vol. 43, No. 1, p. 841.
31. **Wang Y.** Development of a 630 kVA three-phase HTS transformer with amorphous alloy cores. — IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2007, vol. 17, No. 2, pp. 2051—2054.
32. **Xiao L., Shaotao Dai, Liangzen Li, Linye Zhang.** Development of the world's first HTS power substation. — IEEE Transactions on applied superconductivity, 2012, vol. 22, No. 3.
33. **Kotari M.** Development of 2 MVA class superconducting fault current limiting transformer (SFCLT) with YBCO coated conductors. — Journal of Physics: Conf. Series. — IOP Publishing, 2010, vol. 234, No. 3.
34. **Uhei Ohtsubo., Masataka Iwakuma, Stiki Sato, Kizen Sakaki, Akira Tomioka.** Development of REBCO superconducting transformers with a current limiting function—Fabrication and tests of 6.9 kV-400 kVA transformers. — IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2015, vol. 25, No. 3, pp. 1—5.
35. **Glasson N.** Test results and conclusions from a 1 MVA superconducting transformer featuring 2G HTS Roebel cable. — IEEE Trans. Appl. Supercond, 2017, vol. 27, №. 4.
36. **Dai S.** Development of a 1250-kVA superconducting transformer and its demonstration at the superconducting substation. — IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, vol. 26, No. 1, pp. 1—7.
37. **Qiu Q.** Winding design and electromagnetic analysis for a 1250-kVA HTS transformer. — IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2015, vol. 25, No. 1, pp. 1—7.
38. **Hu D.** Development of a single-phase 330kVA HTS transformer using GdBCO tapes. — Physica C: Superconductivity and its applications, 2017, vol. 539, pp. 8—12.
39. **Berger A.** Comparison of the efficiency of superconducting and conventional transformers. — Journal of Physics: Conf. Series. — IOP Publishing, 2010, vol. 234, No. 3.
40. **Aleksandrov N.V.** *Issledovaniye vliyaniya sverkhprovodnikovykh transformatorov...* (Research of influence of superconducting transformers...). Diss. for the Degree of Cand. Sci. (Eng.). Novosibirsk State technical university, 24.04.2014.

[27.02.2019]