

УДК 621.4

ПЕРВЫЙ В РОССИИ ВТСП ТРАНСФОРМАТОР 1 МВА, 10/0,4 кВ

© 2016 г. Э.П. ВОЛКОВ¹, Э.А. ДЖАФАРОВ¹, Л.С. ФЛЕЙШМАН¹,
В.С. ВЫСОЦКИЙ², В.В. СУКОНКИН³

¹ ОАО “Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского”, Москва

² ОАО “Всероссийский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт кабельной промышленности”, Москва

³ ООО “МЕЛДИС”, Москва

E-mail: cryogen@eninnet.ru

Приведены результаты разработки, изготовления и испытания первого в России опытного образца трехфазного силового распределительного трансформатора с обмотками из ВТСП провода второго поколения и магнитопроводом из аморфной электротехнической стали. Описано конструктивное исполнение его элементов и показано улучшение эксплуатационных характеристик ВТСП трансформатора по сравнению с силовыми трансформаторами традиционного исполнения аналогичной мощности.

Ключевые слова: сверхпроводящий трансформатор, ВТСП провод второго поколения, ВТСП трансформатор, ВТСП обмотка, аморфная электротехническая сталь, бронестержневой магнитопровод, криостат, система криообеспечения.

THE FIRST IN RUSSIA HTSC TRANSFORMER 1 MVA, 10/0,4 kV

Е.П. VOLKOV¹, Е.А. DZHAFAROV¹, Л.С. FLEISHMAN¹, В.С. VYSOTSKY², В.В. SUKONKIN³

¹ OJSC “G.M. Krzhizhanovsky Power Engineering Institute”, Moscow

² OJSC “Russian Scientific Research and Development Cable Institute”, Moscow

³ LLC “MELDIS”, Moscow

E-mail: cryogen@eninnet.ru

The results are presented of development, manufacture and test of the first in Russia prototype three-phase distribution power transformer prototype with windings made from second generation HTSC wire and iron core from amorphous electrical steel. The design of its elements is described and the performance improvement is demonstrated in comparison with conventional power transformers of the same power rating.

Key words: superconducting transformer, second generation HTSC wire, HTSC transformer, HTSC winding, amorphous electrical steel, core-and-shell type iron core, cryostat, cryogenic system.

Современный этап научно-технического прогресса характеризуется развитием научно-исследований и внедрением инновационных конструктивных и технологических решений.

ских решений при создании электрооборудования, используемого в энергетике, промышленности, транспорте, космической и оборонной технике, медицине и т.д.

Сверхпроводниковые (СП) технологии относятся к многообещающим технологиям, способным осуществить техническое перевооружение в электроэнергетике и других отраслях экономики.

За рубежом проводятся исследования, разработка и испытания перспективных конструкций высокоэффективного высокотемпературного сверхпроводящего (ВТСП) электрооборудования на основе ВТСП проводов первого и второго поколений, внедрены опытные образцы ВТСП кабелей, трансформаторов, токоограничителей в энергетические системы.

Для разработчиков энергоэффективного, энергосберегающего ВТСП электрооборудования интерес представляют вопросы использования в них ВТСП проводов второго поколения в связи с новыми возможностями по повышению эксплуатационных характеристик и снижению их стоимости.

В перспективных направлениях применения ВТСП энергетического электрооборудования силовые ВТСП трансформаторы различного назначения, конструкций и мощностей занимают одно из ведущих мест [1]. Это объясняется тем, что силовые трансформаторы являются наиболее распространенным электроэнергетическим и электротехническим устройством, передающим и распределяющим электрическую энергию от генератора к потребителю. Число таких трансформаторов в энергосистемах стран мира составляет десятки миллионов. Преобразование энергии в силовых трансформаторах сопровождается потерями, обусловленными принципами их работы. Так, 26,4% всех технических потерь электроэнергии в электрических сетях РФ (при всех используемых номинальных напряжениях) приходится на потери в трансформаторах, из них 10,3% – нагрузочные потери в обмотках (потери КЗ) и 16,1% – потери в магнитопроводе (потери ХХ). В потерях энергии в сетях напряжением 10 кВ общие потери в трансформаторах составляют 39,7%, в том числе потери КЗ – 15,2% и потери ХХ – 24,3%.

Направлениями совершенствования силовых трансформаторов являются снижение потерь электрической энергии, расхода электротехнических и конструкционных материалов, повышение срока службы, надежности, снижение пожаро- и взрывоопасности, техногенной нагрузки на окружающую среду, массогабаритных показателей и т.д. Актуальность повышения технико-экономических показателей силовых трансформаторов обусловлена их решающей ролью как энергетической основы совершенствования существующих и создания новых электроэнергетических систем.

Анализ научно-технической информации о развитии трансформаторостроения показывает, что в качестве первоочередного средства повышения ресурсо- и энергоэффективности силовых трансформаторов, которое перспективно в современной экологической ситуации, целесообразно применение в них ВТСП материалов, так как наиболее выгодное применение сверхпроводимости в электроэнергетике связано с преобразованием и распределением электрической энергии.

Создание энергоэффективных ВТСП трансформаторов может обеспечить в перспективе не только существенное энергосбережение и повышение других технико-экономических показателей, но и переход от технологии сверхвысоких напряжений к технологии сверхбольших токов при передаче и распределении электрической энергии.

Исследования, разработки, изготовление и испытания различных конструкций СП трансформаторов энергетического назначения проводятся в ОАО “Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского” (ОАО “ЭНИН”) с 1974 г. [2].

В ОАО “ЭНИН” впервые в мире была разработана и опубликована теория СП трансформаторов с пульсирующим и вращающимся локализированным магнитным полем возбуждения и рассеяния, СП обмоточных проводов с локализованным магнитным полем [3, 4].

На основе созданной теории СП трансформаторов были разработаны, изготовлены успешно испытаны образцы СП трансформаторов с локализованным магнитным полем возбуждения и рассеяния стержневого и торOIDального типов с пульсирующим магнитным полем и электромашинного типа с вращающимся магнитным полем, в том числе с магнитопроводом из аморфной электротехнической стали отечественного производства [5].

Имея многолетний опыт работы по созданию СП трансформаторов энергетического назначения, ОАО “ЭНИН” в 2011 г. приступил к созданию первого в России энергосберегающего трехфазного силового распределительного ВТСП трансформатора мощностью 1 МВА, напряжением 10/0,4 кВ с магнитопроводом из аморфной электротехнической стали. Уникальность и сложность решения этой проблемы заключалась в том, что до этого времени задача разработки, изготовления и испытания такого СП трансформатора в нашей стране представлялась достаточно сложной, ввиду того, что накопленный опыт работы касался разработок СП трансформаторов значительно меньших мощностей (до 50 кВА).

В создаваемом ВТСП трансформаторе такой мощности с низшим напряжением (НН) 0,4 кВ необходимо было обеспечить величину номинального тока 1443 А в обмотке НН, что для применяемых в настоящее время ВТСП проводов второго поколения достаточно сложная задача.

Основанием для выполнения работы по созданию ВТСП трансформатора 1 МВА, 10/0,4 кВ был проект “Инновационная энергетика” Государственной корпорации по атомной энергии “Росатом”, в рамках которого была поставлена задача разработать, изготовить и испытать опытный образец трехфазного силового распределительного трансформатора с использованием новейших достижений прикладной сверхпроводимости – ВТСП проводов второго поколения. Эту работу на конкурсной основе выполнил по государственному контракту ОАО “ЭНИН”, лидер в нашей стране по исследованиям, разработкам и испытаниям СП трансформаторов энергетического назначения.

Соисполнителями работы по созданию опытного образца ВТСП трансформатора 1 МВА, 10/0,4 кВ ОАО “ЭНИН” были ОАО “ВНИИКП” – лидер в РФ по созданию гибких СП кабелей переменного тока и ООО “МЕЛДИС” – научно-производственное предприятие по изготовлению магнитопроводов из аморфной электротехнической стали и нанокристаллических сплавов, продукция которого успешно реализуется в нашей стране и за рубежом.

Для получения исходных данных, выбора конструктивных и технологических решений, требуемых для создания опытного образца силового распределительного ВТСП трансформатора 1 МВА, 10/0,4 кВ необходимо было разработать, изготовить и испытать макетный образец ВТСП трансформатора и отработать методы изготовления его основных элементов (ВТСП обмоток, неметаллического цилиндрического торoidalного криостата, стеклопластиковых каркасов низковольтной и высоковольтной ВТСП обмоток, сердечников магнитопровода из аморфной электротехнической стали и т.д.).

Макет однофазного ВТСП трансформатора с локализованным магнитным полем и магнитопроводом из аморфной электротехнической стали мощностью 10 кВА был разработан, изготовлен ОАО “ЭНИН” с соисполнителями и прошел испытания в лаборатории сверхпроводниковой техники и технологии, показавшие существенное снижение потерь ХХ (≈ 5 раз) и КЗ (≈ 50 раз) по сравнению с трансформаторами с обмотками из медных или алюминиевых проводов традиционного исполнения аналогичной мощности [2].

На основе созданного макета ВТСП трансформатора, с учетом технических характеристик современных ВТСП проводов второго поколения и передовых мировых достижений в области силовых ВТСП трансформаторов была поставлена задача разработать, изготовить и испытать трехфазный распределительный ВТСП трансформатор с параметрами, приведенными в табл. 1.

Таблица 1

Основные технические параметры опытного образца ВТСП трансформатора

Параметр	Значение параметра
Номинальная мощность, МВА	1,0
Класс напряжения, кВ	10
Частота питающей сети, Гц	50
Число фаз	3
Номинальное напряжение обмотки ВН, кВ	10
Номинальное напряжение обмотки НН, кВ	0,4
Схема и группа соединения обмоток	Д/Y _n -11
Напряжение КЗ, % не более	5,5 ^{±10%}
Потери К3, Вт, не более	600 ^{±10%}
Потери ХХ, Вт, не более	1100 ^{±15%}
Ток ХХ, %, не более	0,9 ^{±30%}

Таблица 2

Расчетные значения конструктивных параметров опытного образца ВТСП трансформатора

Параметр	Значение параметра
Тип магнитопровода	бронестержневой с верхним заплетением ярм
Форма и активное сечение стержней магнитопровода, мм	квадрат 280 × 280
Коэффициент заполнения, не менее	0,8
Форма сечения и размеры боковых ярм, мм	прямоугольник 280 × 140
Форма сечения и размеры верхних/нижних ярм, мм	прямоугольник 280 × 140
Материал магнитопровода	аморфная электротехническая сталь
Число криостатов обмоток	3
Форма криостатов обмоток	цилиндрическая торoidalная
Хладагент	жидкий азот
Рабочее давление в криостатах обмоток	атмосферное
Тип проводника обмоток ВН и НН	ВТСП ленточный провод второго поколения марки SS Amperium wire, ширина 12 мм, ламинированный нержавеющей сталью и изолированный полимидной пленкой

Таблица 3

Основные конструктивные параметры ВТСП обмоток трансформатора

Параметр	Обмотка ВН	Обмотка НН
Схема и группа соединения	Д/Y _n -11	
Конструкция	Катушечная	Цилиндрическая
Номинальное напряжение, кВ	10	0,4
Номинальный ток, А	33,3	1443
Число витков	600	14
Число катушек	50	—
Число слоев	—	4

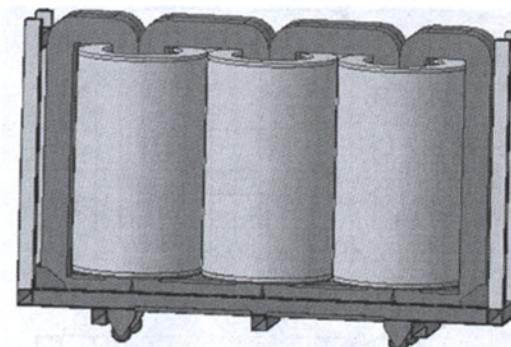


Рис. 1. Конструктивная схема опытного образца трехфазного силового распределительного ВТСП трансформатора 1 МВА, 10/0,4 кВ

Для реализации этих параметров был выполнен технический проект конструктивного и технологического исполнения силового ВТСП трансформатора, включающий в себя инновационные решения его основных элементов, в результате которого были получены следующие расчетные значения (табл. 2).

На рис. 1 показана конструктивная схема опытного образца трехфазного силового распределительного ВТСП трансформатора 1 МВА, 10/0,4 кВ, с обмотками, выполненные из ВТСП провода второго поколения, и бронестержневым магнитопроводом из аморфной электротехнической стали, соответствующая разработанному техническому проекту.

Для создания энергоэффективного ВТСП трансформатора помимо технико-экономических преимуществ, связанных с применением ВТСП проводов второго поколения снижение потерь КЗ в обмотках было предусмотрено понизить потери ХХ (в магнитопроводе). Потери ХХ приносят ущерб в несколько раз больший, чем потери КЗ (в обмотках), составляя основную часть капитализированных потерь энергии в трансформаторе. Стоимость потерь ХХ в два–четыре раза выше стоимости потерь КЗ трансформатора, что объясняется практически постоянным графиком потерь ХХ и переменным графиком потерь КЗ. Для силовых трансформаторов традиционного исполнения мощностью 1 МВА, напряжением 10 кВ потери ХХ составляют до 0,2% полной мощности трансформатора.

Была поставлена задача разработать и изготовить для опытного образца трехфазного силового ВТСП трансформатора 1 МВА, 10/0,4 кВ бронестержневой магнитопровод из аморфной электротехнической стали с верхним заплетением ярм. Такой магнитопровод из аморфной стали позволяет сократить потери энергии (потери ХХ) в четыре–пять раз по сравнению с магнитопроводом с аналогичными массогабаритными показателями, изготовленным из лучших сортов холоднокатаной текстурированной электротехнической стали.

ОАО “ЭНИН” имеет опыт разработки и испытания силового трансформатора с магнитопроводом из аморфной электротехнической стали. В 2004 г. ОАО “ЭНИН” совместно с НПП ООО “МЕЛДИС” и ОАО Холдинговой компанией “Электрозвод” (г. Москва) по договору с ПАО “ФСК ЕЭС” впервые в России был разработан, изготовлен и успешно испытан трехфазный силовой трансформатор 100 кВА, 10/0,4 кВ с обмотками из меди и бронестержневым навитым магнитопроводом из отечественной аморфной электротехнической стали.

До настоящего времени магнитопроводы из аморфной стали в зарубежных опытных образцах ВТСП трансформаторов не применялись, кроме трехфазного ВТСП трансформатора с обмотками из ВТСП провода первого поколения мощностью 630 кВА, напряжением 10/0,4 кВ (Китай).

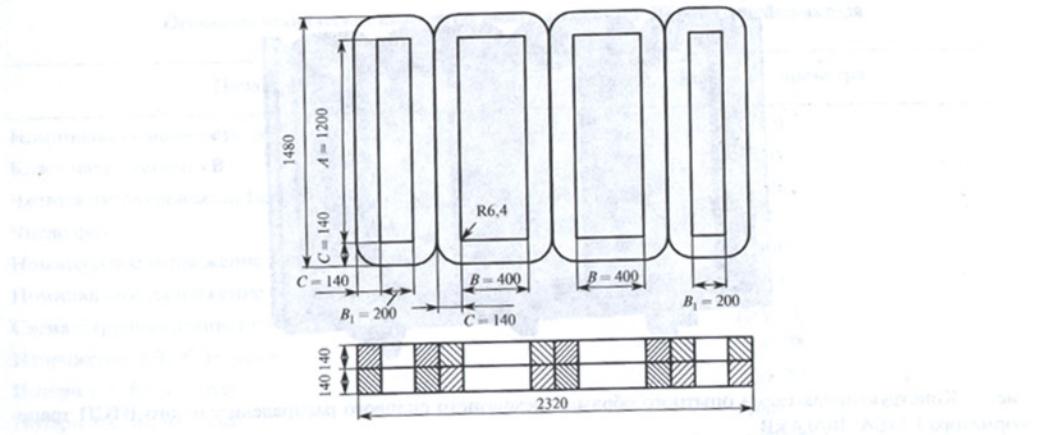


Рис. 2. Бронестержневой магнитопровод из аморфной стали опытного образца ВТСП трансформатора 1 МВА, 10/0,4 кВ

автоматами тяготят основные виды вороньих хвостовиков под бандажами, которые придают ПОЯР основное значение отбора и окончания первых трех стадий синхронного генератора. Аморфный магнитопровод из аморфной стали имеет ряд преимуществ перед традиционными материалами. Аморфная сталь обладает высокими магнитными свойствами, что позволяет создать более компактные и легкие конструкции. Аморфная сталь также обладает высокой механической прочностью и долговечностью.

Рис. 3. Верхнее ярмо сердечника магнитопровода из аморфной стали ГЭ-аморфоСП. Ярмо изготавлено из широких листов аморфной стали с зазорами между ними. На ярме имеются специальные отверстия для крепления криостатов. Аморфная сталь обладает высокими магнитными свойствами и низким весом, что делает ее идеальным материалом для магнитопроводов.

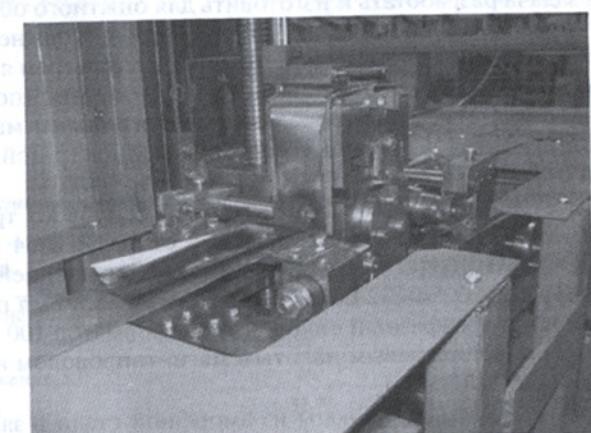


Рис. 4. Сборка сердечников магнитопровода из аморфной стали

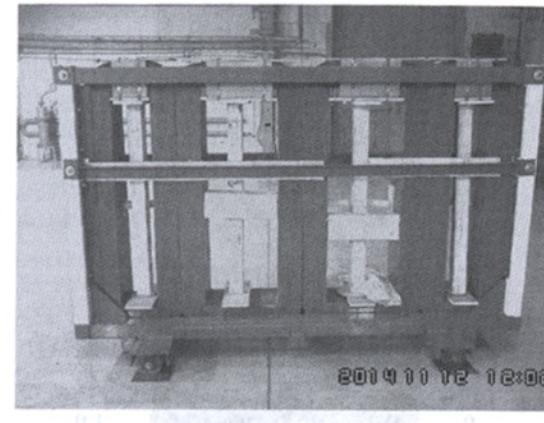


Рис. 5. Магнитопровод из аморфной стали опытного образца ВТСП трансформатора 1 МВА, 10/0,4 кВ в сборе



Рис. 6. Опытный образец силового трансформатора с расплетенными верхними ярами сердечников магнитопровода и смонтированными на стержнях криостатами с ВТСП обмотками

На рис. 2 приведена схема спроектированного трехфазного бронестержневого магнитопровода из аморфной электротехнической стали опытного образца ВТСП трансформатора 1 МВА, 10/0,4 кВ.

Трехфазный магнитопровод бронестержневого типа собирался из восьми сердечников, изготовленных из аморфной стали (четыре широких и четыре узких по размеру ширины окна) собранных из блоков, состоящих из пакетов, набранных из лент аморфной стали толщиной 0,025 мм и шириной 140 мм. Для изготовления магнитопровода опытного образца ВТСП трансформатора 1 МВА, 10/0,4 кВ было изготовлено (с учетом отработки технологии) 5 т аморфной ленты, шириной 140 (+1...-2) мм. Общая масса изготовленного магнитопровода составила ~3,5 т.

Конструктивно все сердечники бронестержневого магнитопровода из аморфной стали выполнялись с верхним заплетением ярм с нахлестом. Наличие нахлеста позволяет улучшить магнитные характеристики сердечников магнитопроводов из аморфной стали по сравнению с разрезными сердечниками без нахлеста и снизить требования к качеству и точности реза.

На рис. 3 дан вид верхнего ярма сердечника магнитопровода с зазорами *A* и *B* между пакетами из аморфной ленты при сборке сердечника с нахлестом.

Проведенные исследования показали, что снижение магнитных характеристик магнитопровода из аморфной стали после проведения монтажных работ, связанных с

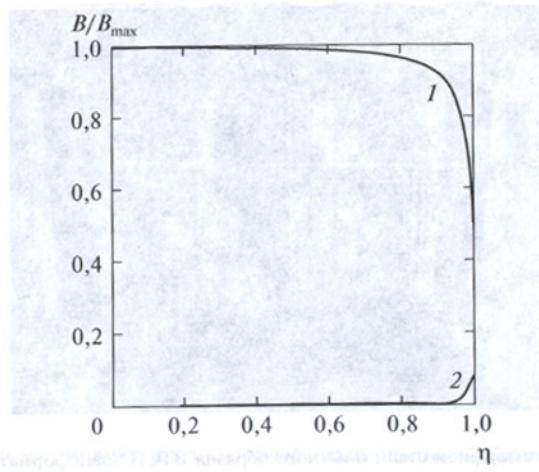


Рис. 7. Зависимости расчетных абсолютных значений осевой (1) и радиальной (2) составляющих индукции магнитного поля от вертикальной координаты точки в канале рассеяния

установкой криостатов и ВТСП обмоток на стержни магнитопровода трансформатора (расплетение и заплетение верхних ярм сердечников) составляет менее 10%. Разработанная технология производства магнитопровода из аморфной стали для ВТСП трансформаторов может быть рекомендована для промышленного применения.

На рис. 4 показан процесс сборки сердечников магнитопровода ВТСП трансформатора из отдельных блоков пакетов, набранных из лент аморфной стали.

На рис. 5 приведен изготовленный трехфазный бронестержневой магнитопровод из аморфной электротехнической стали отечественного производства для опытного образца ВТСП трансформатора 1 МВА, 10/0,4 кВ в лаборатории сверхпроводниковой техники и технологии ОАО «ЭНИН», на рис. 6 – опытный образец ВТСП трансформатора с расплетенными верхними ярмами сердечников магнитопровода из аморфной стали и смонтированными на стержнях магнитопровода криостатами с ВТСП обмотками.

Результаты электромагнитного расчета, определившего конструктивные параметры обмоток опытного образца трехфазного силового распределительного ВТСП трансформатора 1 МВА, 10/0,4 кВ, приведены в табл. 3.

При проектировании обмоток ВТСП трансформатора и выборе обмоточных ВТСП проводов важно учитывать магнитное поле, влияющее на сверхпроводящие параметры обмоточного провода. При работе трансформатора в режиме нагрузки витки обмоток находятся в магнитном поле рассеяния, сосредоточенном, главным образом, в канале рассеяния между обмотками НН и ВН трансформатора. В средней по высоте обмоток части канала рассеяния доминирует осевая составляющая магнитного поля, на краях обмоток возникает радиальная составляющая, перпендикулярная к плоскости ВТСП ленточного провода. Наибольшее негативное воздействие на токонесущую способность ленточных ВТСП проводов и величину потерь энергии в них в переменном магнитном поле оказывает перпендикулярная компонента вектора индукции магнитного поля.

Для уменьшения магнитного поля рассеяния в опытном образце ВТСП трансформатора 1 МВА, 10/0,4 кВ был применен принцип локализации магнитного поля рассеяния, достигаемой неплотным расположением слоев обмотки НН и катушек обмотки ВН трансформатора.

Для реализации этого методом наложения проведен расчет абсолютных величин осевой (вертикальной) составляющей $|B_{ax}|$ и радиальной (горизонтальной) составляю-

щей $|B_{rad}|$ индукции магнитного поля в опытом образце ВТСП трансформатора 1 МВА, 10/0,4 кВ. Результаты расчетов показывают, что радиальная составляющая индукции магнитного поля в опытом образце ВТСП трансформатора 1 МВА, 10/0,4 кВ в 1,5 раза выше, чем осевая. Для снижения радиальной составляющей индукции магнитного поля в опытом образце ВТСП трансформатора 1 МВА, 10/0,4 кВ предложен метод наложения, при котором катушки обмотки ВН трансформатора расположены в зоне максимальной индукции магнитного поля в опытом образце ВТСП трансформатора 1 МВА, 10/0,4 кВ, а катушки обмотки НН трансформатора расположены в зоне минимальной индукции магнитного поля в опытом образце ВТСП трансформатора 1 МВА, 10/0,4 кВ.

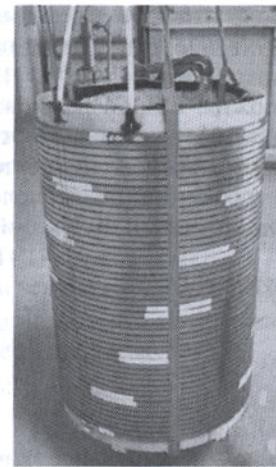


Рис. 8. Обмотки одной фазы опытного образца ВТСП трансформатора 1 МВА, 10/0,4 кВ в сборе

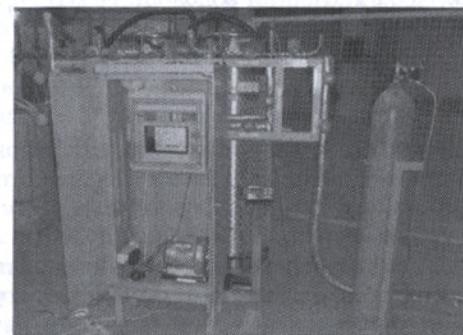


Рис. 9. Система автоматической заправки криостатов жидким азотом и автоматического поддержания его уровня

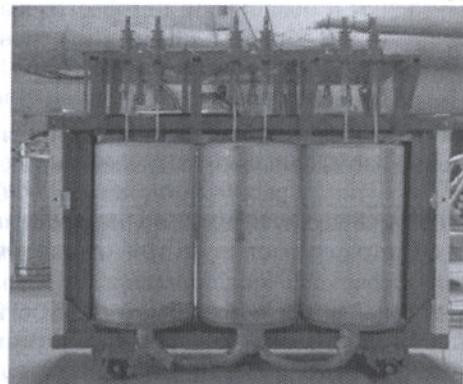


Рис. 10. Трехфазный силовой распределительный ВТСП трансформатор 1 МВА, 10/0,4 кВ

щей $|B_d|$ индукции магнитного поля в канале рассеяния между обмотками ВН и НН. Влияние ферромагнитного магнитопровода учитывалось методом изображений: в расчетную схему помимо реальных обмоток ВН и НН добавлялись их зеркальные отображения на поверхности стержня. В произвольных точках, расположенных в канале рассеяния, вычислялись $|B_{ax}|$ и $|B_d|$ от каждой обмотки и ее изображения, полученные значения алгебраически суммировались с соответствующим знаком, зависящим от направления тока в обмотке и радиального расположения расчетной точки. При этом для модулей составляющих магнитной индукции получаются следующие выражения:

$$|B_{ax}| = \sqrt{2} \frac{\mu_0 I w}{\ell} \beta; \quad (1)$$

$$|B_r| = \sqrt{2} \frac{\mu_0 I w}{\ell} \alpha, \quad (2)$$

где μ_0 – магнитная постоянная; I , w – действующее значение тока и число витков в соответствующей обмотке; ℓ – осевой размер (высота) обмотки, причем величина $\sqrt{2}Iw/\ell$ является линейной плотностью магнитодвижущей силы данной обмотки по амплитудному значению.

В выражениях (1) и (2) коэффициенты β и α находятся из отношений координат точки в канале рассеяния к высоте обмоток ℓ по формулам:

$$\beta = \frac{1}{2\pi} \left| \operatorname{arctg} \frac{\eta+1}{\varepsilon} - \operatorname{arctg} \frac{\eta-1}{\varepsilon} \right|; \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{1}{4\pi} \left| \ln \frac{\varepsilon^2 + (\eta-1)^2}{\varepsilon^2 + (\eta+1)^2} \right|, \quad (4)$$

где $\varepsilon = r/(\ell/2)$ – относительная радиальная координата r расчётной точки, отсчитываемая от поверхности каждой обмотки или ее изображения с учетом знака (положительный знак соответствует точкам справа от поверхности), выраженная в единицах полувысоты обмотки; $\eta = z/(\ell/2)$ – относительная осевая координата z этой точки, отсчитываемая от горизонтальной плоскости симметрии.

Расчеты результатирующей магнитной индукции по (1)–(4) с последующим алгебраическим суммированием были выполнены для точек осевой линии в канале рассеяния. Абсолютные значения осевой и радиальной составляющих магнитной индукции, выраженные в единицах максимальной магнитной индукции в канале рассеяния при номинальных токах –

$$B_{\max} = \sqrt{2} \mu_0 I w / \ell, \quad (5)$$

приведены на рис. 7 ($B_{\max} \approx 45$ мТл).

Из рис. 7 следует, что осевая составляющая магнитного поля рассеяния имеет практическое постоянное значение вдоль большей части канала рассеяния, но существенно уменьшается вблизи торца обмоток на расстоянии, меньшем 10% их высоты. Радиальная составляющая имеет незначительную величину на протяжении почти всего канала и только вблизи торца обмоток возрастает до 10% от максимальной осевой составляющей.

В соответствии с проведенными расчетами были разработаны оптимальные конструкции ВТСП обмоток трансформатора, в которых достигнуто существенное уменьшение влияния магнитного поля рассеяния и, в особенности, его перпендикулярной составляющей, на токонесущую способность обмоточных ВТСП проводов и потери энергии в них.

Общий вид ВТСП обмоток одной фазы трансформатора в сборе показан на рис. 8.

Система криообеспечения опытного образца трехфазного ВТСП трансформатора 1 МВА, 10/0,4 кВ включала сосуды хранения жидкого азота, криогенные трубопроводы и устройство автоматического поддержания уровня жидкого азота в криостатах с ВТСП обмотками трансформатора.

На рис. 9 представлена разработанная и изготовленная система автоматической заправки криостатов жидким азотом и автоматического поддержания его уровня в соответствии с требованиями рабочего режима опытного образца ВТСП трансформатора.

На рис. 10 показан общий вид первого в России опытного образца трехфазного силового распределительного ВТСП трансформатора 1 МВА, 10/0,4 кВ в лаборатории сверхпроводниковой техники и технологии ОАО «ЭНИН».

Опытный образец ВТСП трансформатора выдержал стендовые испытания, в которых были получены следующие результаты:

– величина тока ХХ – 0,21%;

– потери ХХ – 0,68 кВт;

– напряжение КЗ – 3,3%;

– потери КЗ в каждой фазе (электрические потери при номинальном действующем токе обмотки НН 1443 А) – ≈ 150 Вт.

Таким образом, испытания опытного образца трехфазного трансформатора 1 МВА, 10/0,4 кВ с обмотками из ВТСП проводов второго поколения и магнитопроводом из аморфной электротехнической стали показали снижение тока ХХ в ≈ 5 раз, потерь ХХ – в $\approx 2,8$ раза, напряжения КЗ – в $\approx 1,7$ раза и потерь КЗ – в ≈ 27 раз по сравнению с соответствующими значениями в силовых трансформаторах традиционного исполнения аналогичной мощности.

Использование инновационной технологии в электрооборудовании энергетического назначения, к которому относятся силовые трансформаторы, позволит сделать их энергоэффективными и энергосберегающими устройствами, благодаря применению новых материалов – ВТСП проводов второго поколения для обмоток и аморфной электротехнической стали для магнитопроводов и может обеспечить в перспективе выход России на передовой уровень развития электроэнергетического оборудования.

Создание первого в России опытного образца силового распределительного трансформатора 1 МВА, 10/0,4 кВ с обмотками из ВТСП проводов второго поколения и магнитопроводом из аморфной электротехнической стали стало началом применения этих устройств в энергосистеме нашей страны.

ВЫВОДЫ

Впервые в России был разработан, изготовлен и успешно испытан опытный образец трехфазного силового распределительного ВТСП трансформатора мощностью 1 МВА, напряжением 10/0,4 кВ с обмотками из ВТСП провода второго поколения и магнитопроводом из аморфной электротехнической стали.

Впервые в практике ВТСП трансформаторостроения в одном устройстве применены новейшие материалы и инновационные технологии: ВТСП обмоточный провод второго поколения, аморфная электротехническая сталь, ВТСП обмотки с локализированным магнитным полем, трехфазный бронестержневой магнитопровод с верхним заплетением ярм с нахлестом.

Учитывая тенденции сверхпроводникового электрооборудования энергетического назначения, силовые ВТСП трансформаторы – наиболее распространенные элементы энергетических систем, имеют высокий рыночный потенциал. Продолжение работ должно быть направлено на создание ВТСП трансформаторов различных конструкций, мощностей и классов напряжения, что обеспечит повышение энергоэффективности при преобразовании, передаче и распределении электрической энергии в электроэнергетике, промышленности, транспорте.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волков Э.П., Джсафаров Э.А. Сверхпроводящий трансформатор с вращающимся магнитным полем // Изв. РАН. Энергетика. 2012. № 3.
 2. Волков Э.П., Джсафаров Э.А. ВТСП трансформатор с локализированным магнитным полем // Изв. РАН. Энергетика. 2013. № 5.
 3. Волков Э.П., Джсафаров Э.А. Параметры ВТСП трансформатора // Изв. РАН. Энергетика. 2015. № 1.
 4. Лутидзе Ш.И., Джсафаров Э.А. Сверхпроводящие трансформаторы. М.: "Научтехлитиздат", 2002.
 5. Патент РФ № 2569931 / Э.П. Волков, Э.А. Джсафаров, Л.С. Флейшман, В.В. Суконкин, А.И. Зайцев, Э.Э. Джсафаров. Пространственный симметричный магнитопровод // БИ. 2015. № 34.

Поступила в редакцию

11.IV.2016