

УДК 621.314.2

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ

Е. Н. Андреев,ст. научный сотрудник
ФГУП «НИИ Электромаш»**Н. Ю. Вандюк,**канд. техн. наук, научный сотрудник
Институт химии силикатов РАН**Д. А. Волков,**

аспирант

Д. А. Коротков,

аспирант

М. Ю. Платонова,

канд. техн. наук, доцент

Л. И. Чубраева,

доктор техн. наук, член-корр. РАН

Научно-исследовательский институт инновационных технологий

в электромеханике и энергетике Санкт-Петербургского государственного
университета аэрокосмического приборостроения

Дан обзор современного состояния и перспектив развития трансформаторов с использованием высокотемпературной сверхпроводимости. Рассмотрены особенности разработки трехфазного трансформатора броневоего типа с обмотками из ленточного высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП) и магнитопроводом из ленточной нанокристаллической стали. Представлены результаты математического моделирования электромагнитных полей трансформатора, проанализированы способы ограничения токов короткого замыкания.

A review the modern state and future development of the high-temperature superconductor transformers is given. We consider the three-phase shell-type transformer with windings of high-temperature superconductor tape (HTS) and a core of tape-type nanocrystalline steel. The results of mathematical modelling of electromagnetic fields of the transformer are presented and methods of short-circuit currents limitation are analyzed.

Введение

Явление сверхпроводимости заключается в практически полном исчезновении электрического сопротивления некоторых материалов при понижении температуры ниже критической. Удельное электрическое сопротивление сверхпроводников находится на уровне 10^{-26} Ом · м. Сверхпроводимость была открыта в металлах в 1911 г. В 1986 г. была открыта высокотемпературная сверхпроводимость (ВТСП) в керамических материалах.

Сверхпроводники характеризуются критическими параметрами, при которых происходит их переход в резистивное состояние, — это критическая температура T_C , критическое магнитное поле B_C , критическая плотность тока j_C .

Для практического использования в технической сверхпроводимости пригодны низкотемпературные сверхпроводники (НТСП) на основе сплава Nb—Ti ($T_C = 9,3$ К) и соединения Nb₃Sn ($T_C = 17,9$ К). Отечественной промышленностью освоено

но изготовление широкой номенклатуры проводов из этих материалов для постоянного и переменного тока. Для охлаждения НТСП обмоток используют жидкий и газообразный гелий (рабочие температуры 4,2–12 К).

Высокотемпературные сверхпроводники, имеющие критическую температуру выше 35 К, могут охлаждаться газообразным гелием, жидким водородом, неоном или азотом. Среди этих хладагентов жидкий (сжиженный) азот — наиболее дешевый и доступный, производимый промышленностью в больших количествах. Кроме того, он, как и жидкий водород, обладает высокими диэлектрическими характеристиками и по своим электроизоляционным свойствам близок к трансформаторному маслу.

Открытие ВТСП-материалов с критической температурой, превышающей 77,3 К (температуру кипения жидкого азота при нормальном давлении), позволило существенно упростить систему криостатирования. С учетом неизбежных потерь хладагента эксплуатационные расходы на захлаживание на азотном уровне оказываются в сотни раз ниже расходов на криостатирование на гелиевом уровне температур. Упрощенная система охлаждения принципиально более надежна в эксплуатации. В целом применение ВТСП в электротехническом оборудовании создает возможности для повышения надежности данного оборудования (отсутствие перепадов температуры, отсутствие старения электрической изоляции и др.).

В технической сверхпроводимости используются ленточные ВТСП-материалы на основе соединений висмута $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ (Bi-2212) и $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (Bi-2223), а также объемные ВТСП-материалы (массивы) на основе висмута (Bi-2223) и иттрия (Y-123). Поскольку сверхпроводящие токонесущие элементы должны соответствовать спектру технических требований, частично взаимно противоречивых, то

они представляют собой сложные композиционные конструкции разнородных по физическим свойствам и по функциональному назначению материалов: собственно сверхпроводника, стабилизирующего материала, материала диффузионных барьеров, упрочняющих и изоляционных материалов. Плотность критического тока ВТСП-лент в собственном поле при 77 К находится на уровне 10^8 А/м^2 .

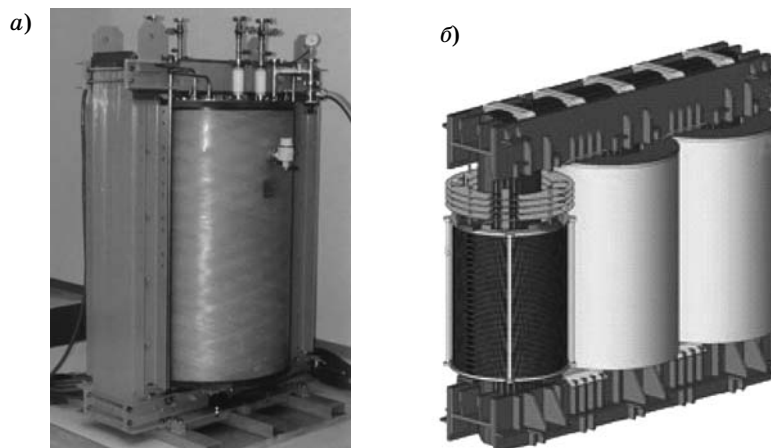
Одними из ВТСП-устройств, представляющих интерес для энергетики, являются трансформаторы. Их совершенствование в настоящее время осуществляется не за счет повышения КПД, который у трансформаторов является высоким, а связано с применением новых материалов для обмоток, магнитной системы или электрической изоляции.

В этих условиях представляет интерес оценка перспектив применения ВТСП-трансформаторов. Основными экономическими, эксплуатационными и экологическими преимуществами силовых трансформаторов на базе ВТСП-проводников являются:

- уменьшение массогабаритных характеристик;
- экологическая безопасность;
- отсутствие старения изоляции (фактор продления срока службы).

Ведущие промышленно развитые страны (США, Германия, Франция, Япония, Австралия, Швеция, Англия) к настоящему времени изготовили опытные образцы ВТСП-трансформаторов для проверки новых решений, принятых при их конструировании (рис. 1) [1–5]. Часть из них была установлена в опытную эксплуатацию в энергосети с целью проверки их работоспособности параллельно с трансформаторами традиционных конструкций. В таблице приведены данные разработок ВТСП-трансформаторов за последние 10 лет.

В настоящее время ведутся разработки силовых ВТСП-трансформаторов мощностью 10 и 20 МВ · А.



■ **Рис. 1.** Варианты конструктивного исполнения ВТСП-трансформаторов: а — однофазный ВТСП-трансформатор бронзового типа мощностью 500 кВ · А (Япония); б — трехфазный ВТСП-трансформатор стержневого типа мощностью 60 МВ · А (фирма Hitachi)

■ Основные технические характеристики ВТСП-трансформаторов

Фирма	Страна, год разработки	Мощность, кВ·А	Напряжение, кВ	Тип*	Число фаз
ABB	Швейцария, 1997	630	13,72/0,42	–	3
Fuji / SEC / Kyushu University Group	Япония, 1997	500	6,6/3,3	Б	1
Waukesha Electric Systems	США, 1998	1000	–	Б	1
Soonchunhyang University Woosuk University Korea Polytechnic University Chonnam National University Seoul National University	Корея, 2001	10	0,44/0,22	С	3
Bergische Universitat Wuppertal SKODA VYZKUM Slovak Academy of Sciences	Германия, Чехия, Словакия, 2001	14	0,4/0,2	Б	1
Hyundai	Япония, 2005	60000	–	С	3
Ansaldo	Италия, 2005	10	–	Б	1

* С — трансформатор стержневого типа; Б — трансформатор броневое типа.

Конструкция модельного ВТСП-трансформатора

Для моделирования процессов в ВТСП-трансформаторах коллективом авторов разработан трехфазный двухобмоточный трансформатор броневое типа мощностью 60 кВ·А и линейным напряжением 690/400 В, который предназначен для работы в составе автономной электроэнергетической установки [3, 4]. Конструкция трехфазного двухобмоточного трансформатора представлена на рис. 2. Отличительной особенностью данной конструкции является использование ленточного ВТСП-проводника для изготовления обмоток и ленточной нанокристаллической стали для изготовления магнитопровода. Разработана уникальная технология изготовления сердечника и ярма, которая обеспечивает ремонтпригодность трансформатора и повышает его технологичность.

Ленточная нанокристаллическая магнитомягкая сталь имеет более низкие удельные потери по сравнению с электротехнической сталью. Сердечник и ярмо трансформатора набираются из единичных галет, которые наматываются на отдельных каркасах с последующей термообработкой и пропиткой.

Сердечник трансформатора, набранный из галет, укладывается на несущий каркас из нержавеющей стали. Каркас выполняется полым для улучшения условий охлаждения сердечника. Увеличение диаметра центрального канала ведет к увеличению расхода ВТСП-ленты (рис. 3). Поэтому диаметр центрального канала выбран минимально возможным по условиям охлаждения активной стали.

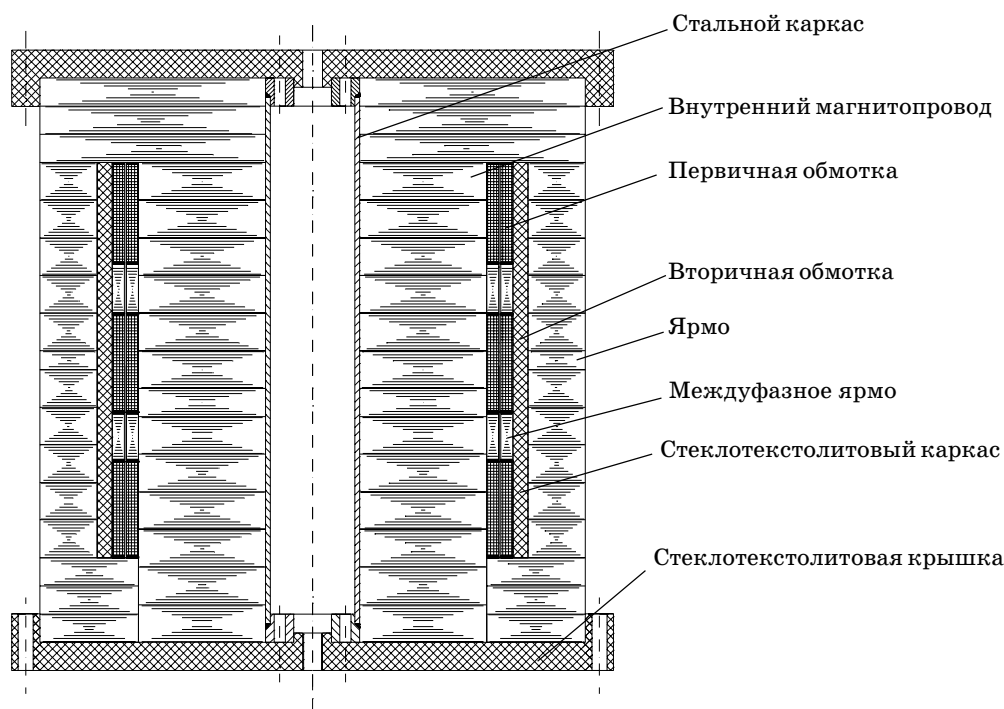
Сборка галет ярма производится на стеклотекстолитовом каркасе, что обеспечивает доступ как к отдельным частям магнитопровода, так и к обмоткам. Обмотки трансформатора изготавливаются из ленточного сверхпроводника на основе висмутовой керамики Bi-2223/Ag с критическим током более 90 А в собственном поле при температуре 77 К. Обмотки трех фаз располагаются вертикально на одном стержне друг над другом. Корпусная изоляция образована стеклотканью, пропитанной эпоксидной смолой.

Предусматривается соединение фаз обмоток трансформатора: «звезда с заземлением нулевой точки — звезда». Нулевой провод первичной обмотки, выполненный из обмоточной меди, дает возможность для замыкания третьей гармоники тока намагничивания каждой фазы, что позволяет избежать потерь в сверхпроводнике от токов третьей гармоники.

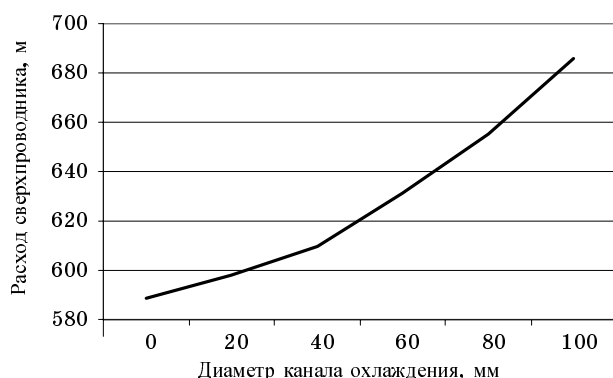
Вся конструкция помещается в криостат в среде жидкого азота (77 К). При необходимости производится откачка паров, что позволяет предусмотреть понижение рабочей температуры до 64 К (переохлажденный азот) или до 20 К (при использовании криоохладителя Гиффорда—Макмагона).

Математическое моделирование электромагнитных полей ВТСП-трансформатора

Разработка конструкции ВТСП-трансформатора основана на исследовании картины электромагнитных полей как в магнитопроводе, так и в немагнитном зазоре (главном канале рассеяния). Это



■ Рис. 2. Конструкция ВТСП-трансформатора



■ Рис. 3. Зависимость расхода ВТСП-ленты от диаметра центрального канала

обусловлено использованием ВТСП-ленты, параметры которой существенно зависят от величины радиальной составляющей внешнего электромагнитного поля по отношению к широкой стороне ленты. Кроме того, необходимо выявить места локальных перегревов, чтобы обеспечить интенсивный отвод потерь от магнитопровода и обмоток. Исследование картины распределения поля в магнитопроводе трансформатора проводилось при помощи программы MATLAB, подпрограммы FEMLAB, которая позволяет получать данные с заданной степенью точности. В результате исследования были получены картины распределения поля в магнитопроводе (рис. 4), где стрелками 1–8 указаны место и направление сечений математи-

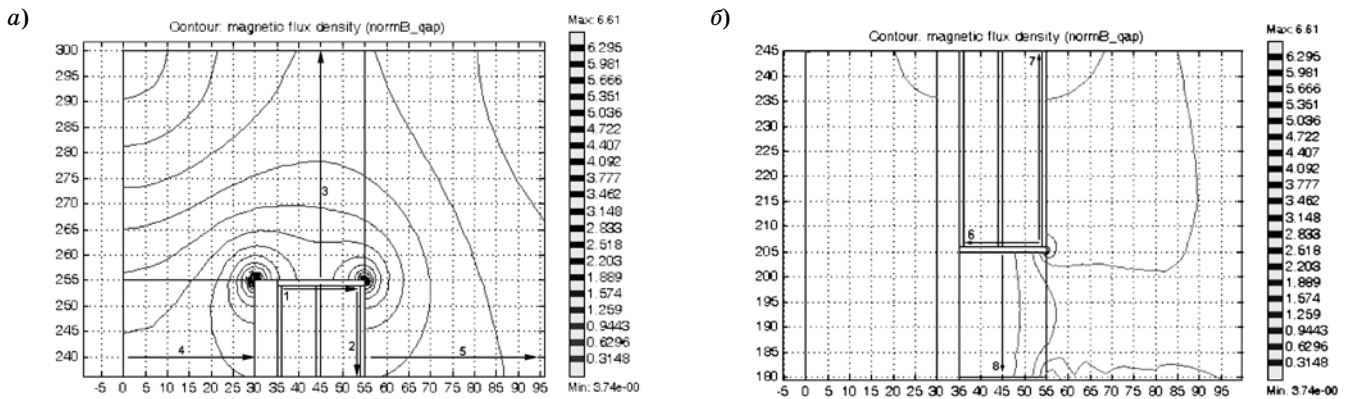
ческой модели, для которых приводятся двухмерные графики распределения индукции магнитного поля (рис. 5).

Как следует из приведенных графиков, величина радиальной составляющей электромагнитного поля к широкой стороне ВТСП-ленты находится в пределах от 1 до 10 мТл и практически не влияет на токонесущую способность.

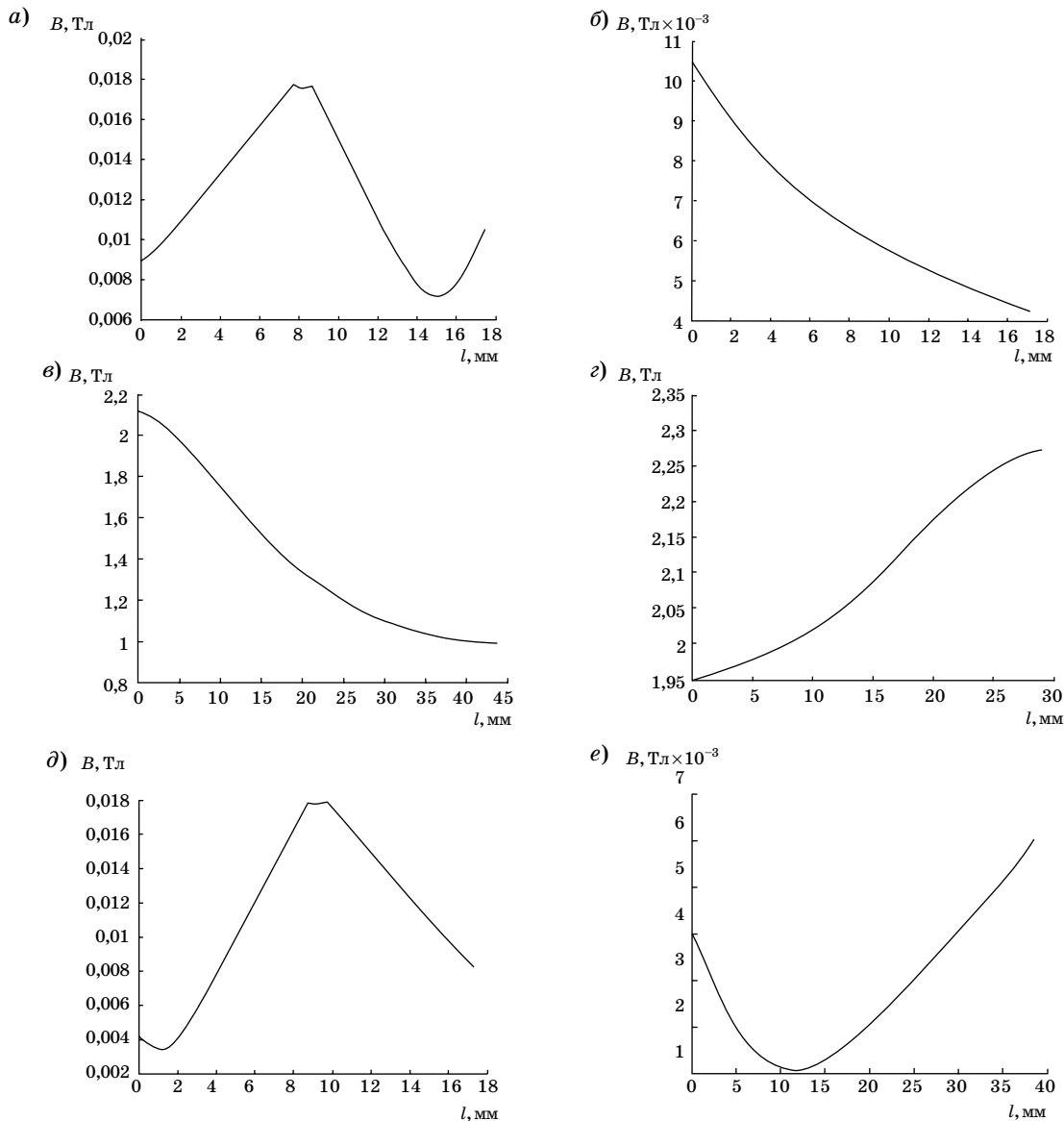
Исследование методов ограничения токов короткого замыкания ВТСП-трансформатора

Величина напряжения короткого замыкания в ВТСП-трансформаторе в несколько раз ниже, чем в трансформаторах традиционного исполнения. Это обусловлено тем, что индуктивное сопротивление рассеяния тонких обмоток из ВТСП-ленты существенно ниже, чем у медных обмоток. В результате значительно возрастает установившийся ток короткого замыкания. Если в трансформаторах традиционного исполнения токи короткого замыкания достигают 20-кратных значений, то в ВТСП-трансформаторах имеют место 60–70-кратные токи.

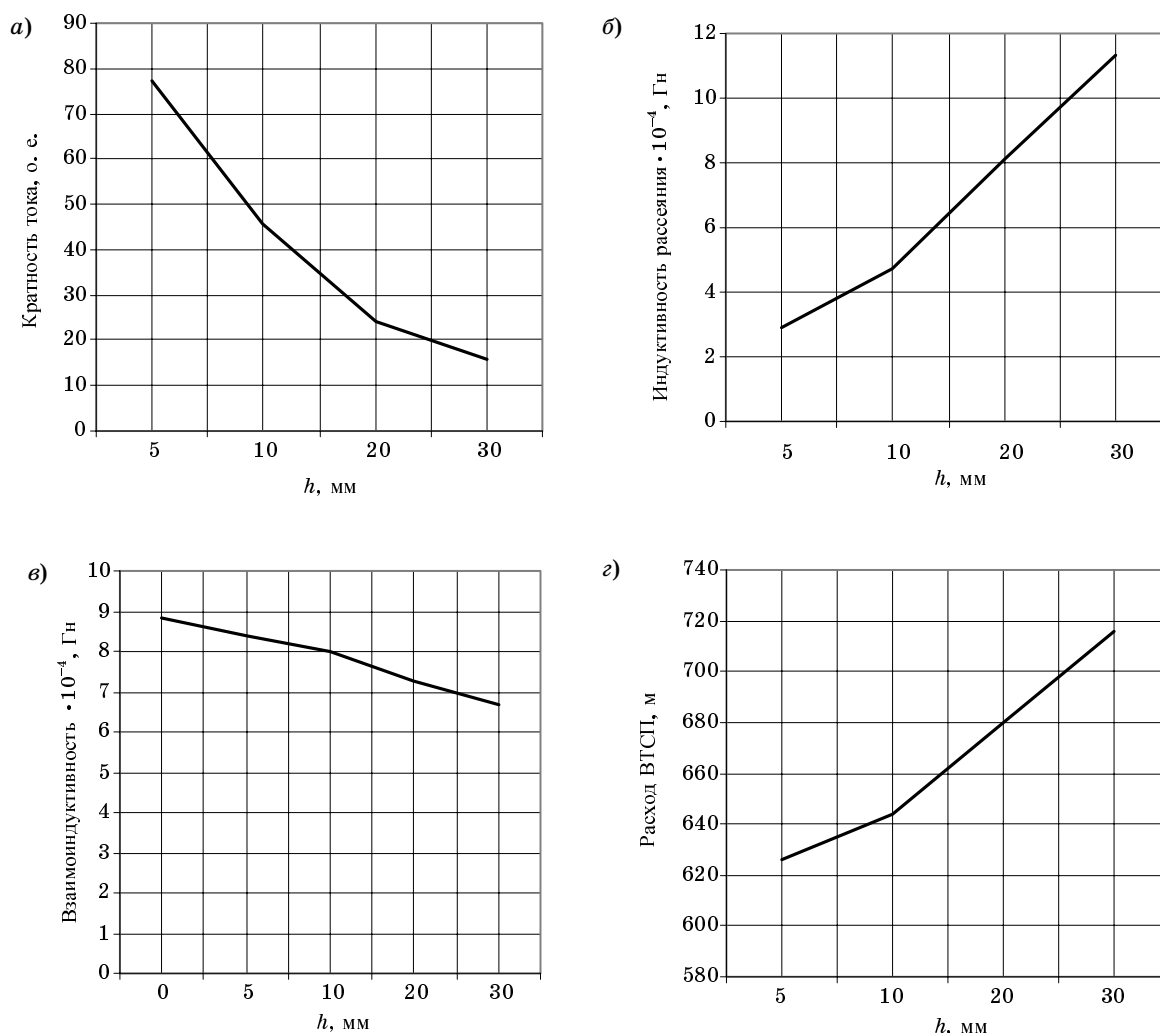
Величину токов короткого замыкания можно ограничить либо введением дополнительного канала рассеяния, либо установкой аппаратов токовой защиты. Увеличение ширины канала рассеяния позволяет существенно снизить токи короткого замыкания (рис. 6, а) за счет увеличения индуктивности рассеяния (рис. 6, б). Но при этом происходит снижение взаимоиндуктивности обмо-



■ Рис. 4. Картина электромагнитного поля на стыке сердечника с ярмом: а — в верхней части трансформатора; б — между фазами трансформатора



■ Рис. 5. Зависимость индукции магнитного поля от расстояния: а — по стрелке 1; б — по стрелке 2; в — по стрелке 3; г — по стрелке 4; д — по стрелке 6; е — по стрелке 7



■ Рис. 6. Зависимости параметров трансформатора от ширины h канала рассеяния: а — кратности тока короткого замыкания; б — индуктивности рассеяния; в — взаиминдуктивности обмоток; г — расхода ВТСП-ленты

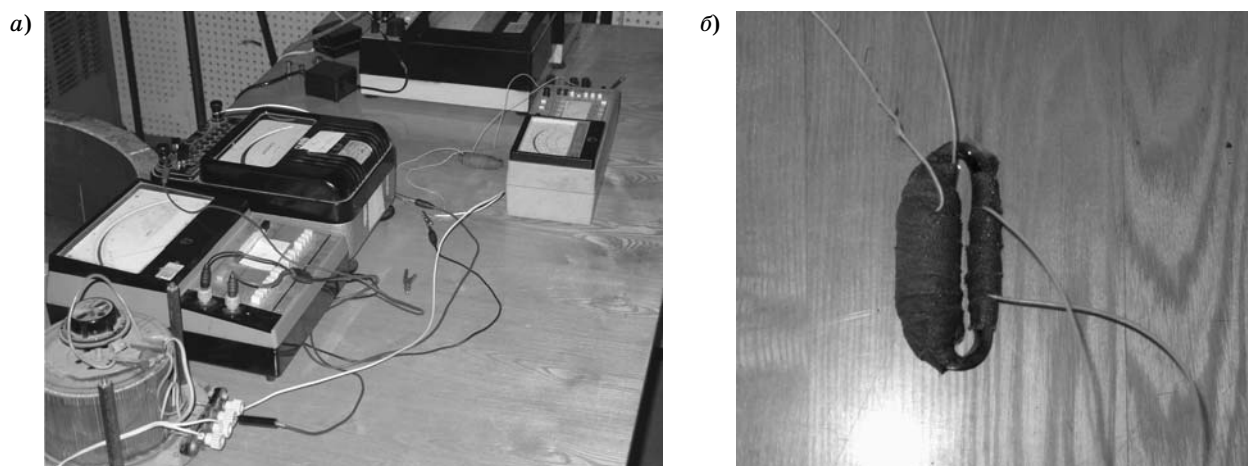
ток (рис. 6, в) и увеличение расхода ВТСП-ленты (рис. 6, г). Кроме того, увеличение канала рассеяния ведет к появлению радиальной составляющей поля в канале, которая существенно уменьшает критический ток ВТСП-ленты и приводит к снижению эффективности использования сверхпроводника. Одним из способов уменьшения нормальной составляющей магнитного поля является введение в обмоточную зону добавочных ферромагнитных колец, что усложняет конструкцию в целом [1].

Таким образом, введение дополнительного канала рассеяния имеет целый ряд указанных выше негативных последствий. Одним из интересных технологических решений является применение сверхпроводящих ограничителей токов (СОТ) короткого замыкания. Одним из вариантов СОТ является резистивный ограничитель тока, включаемый последовательно с защищаемым устройством.

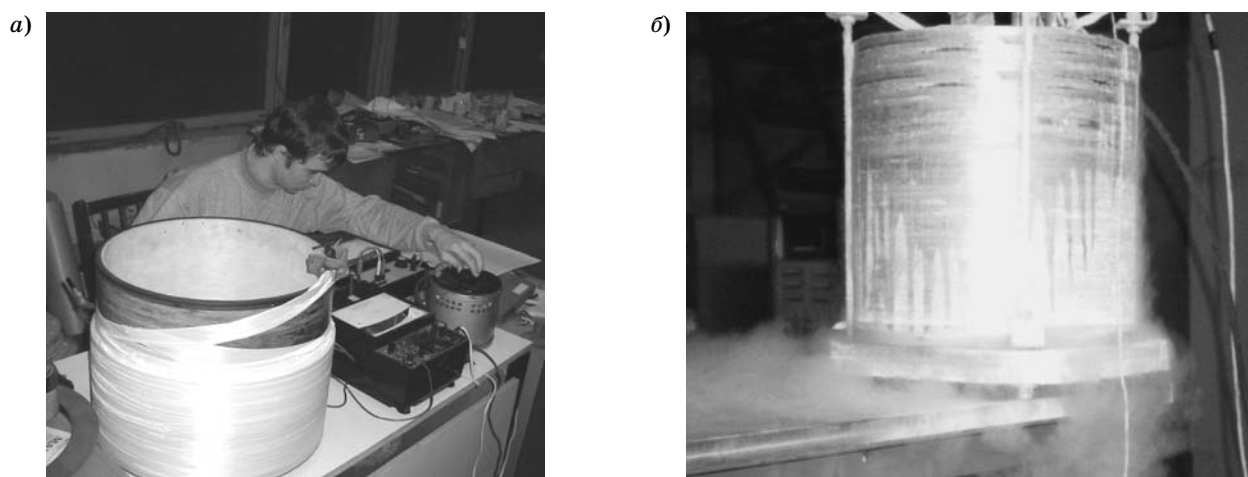
При возникновении режима короткого замыкания сверхпроводник ограничителя тока переходит в резистивное состояние. В результате в защищаемой цепи возникает активное сопротивление матрицы сверхпроводника, что и ограничивает ток короткого замыкания. Именно таким ограничителем планируется защитить разрабатываемый ВТСП-трансформатор.

Физическое моделирование процессов в сердечнике из аморфной стали

Для оценки влияния низких температур на величину удельных потерь в магнитопроводе ВТСП-трансформатора были проведены исследования сердечника из ленточной нанокристаллической стали 5БДСР при комнатной температуре и при температуре жидкого азота. Общий вид экспериментальной установки и исследуемый сердечник представлены на рис. 7.



■ *Рис. 7. Физическое моделирование процессов в сердечнике: а — общий вид установки; б — сердечник из нанокристаллической стали*



■ *Рис. 8. Физическое моделирование процессов в однофазном ВТСП-трансформаторе: а — при комнатной температуре; б — в среде жидкого азота*

Результаты исследований показывают, что удельные потери нанокристаллической стали марки 5БДСР примерно в 20 раз меньше по сравнению с обычной электротехнической сталью (при комнатной температуре) и практически не изменяются при переходе к азотному уровню температур. У обычных электротехнических сталей при переходе к азотному уровню температур наблюдается значительное увеличение удельных потерь. Это делает нецелесообразным использование таких сталей для сердечников ВТСП-устройств.

После изготовления элементов магнитопровода из нанокристаллической стали необходимо подвергнуть их термообработке в продольном или поперечном магнитных полях для увеличения значения индукции насыщения. Такая термообработка — обязательная часть технологического процесса.

Для проверки расчетных методик, используемых при проектировании трансформатора, была

изготовлена модель однофазного ВТСП-трансформатора и проведены ее экспериментальные исследования. Сердечник модели однофазного трансформатора, на который осуществлялась укладка обмоток из висмутовой ленты Vi-2223/Ag, был выполнен из аморфной стали марки 2НСР. На рис. 8 показано проведение испытаний модели однофазного ВТСП-трансформатора.

Полученные результаты показали хорошее совпадение опытных и расчетных данных, они позволяют делать вывод о стабильной работоспособности разрабатываемого устройства и возможности масштабирования на более высокие мощности.

Заключение

Математическое моделирование электромагнитных полей показывает, что для разработанной конструкции ВТСП-трансформатора радиальная

составляющая электромагнитного поля минимальна и не оказывает существенного влияния на токнесущую способность ВТСП-ленты. Данные математического моделирования были подтверждены результатами физического моделирования. На основе проведенных исследований выбраны оптимальные размеры магнитопровода и мини-

мальный расход сверхпроводника, а также принято решение о защите ВТСП-трансформатора от токов короткого замыкания при помощи сверхпроводникового ограничителя тока.

Работа проводится при поддержке гранта РФФИ 05-08-50292, НИР ГУАП № 474 и НИР ГУАП № 1.6.04.

Литература

1. Zizek F. at all. End-Winding Region Configuration of an HTS Transformer // Applied superconductivity. IEEE superconductivity committee. March 2002. Vol. 12. N 1. P. 904–906.
2. Lee S. at all. Test Results of a Three Phase HTS Transformer with Double Pan Cake Windings//Applied superconductivity. IEEE superconductivity committee. March 2002. Vol. 12. N 1. P. 808–811.
3. Andreev E. N. at all. Development of Three-Phase Transformer with HTSC Windings and Amorphous Alloy Cores// ICEM 2006: Proc. Ref. 347. 6 p.
4. Kosareva T. I., Volkov D. A., Korotkov D. A. Analysis of the Wave Electromagnetic Processes in the HTS Transformer's Windings// Wave Electronics and its Applications in the Information and Telecommunication Systems: VIII International Conference for Young Researchers. Preliminary Program and Abstracts. Spb.: SUAI, 2005. P. 118–120.
5. http://www.wtec.org/loyola/scpa/10_01.htm
6. http://www.igc.com/superpower/products/hts_components/transformer.htm