

05

## Применение стабильного перегруженного режима в высокотемпературных сверхпроводниковых защитных резисторах

© В.А. Мальгинов,<sup>1</sup> А.В. Мальгинов,<sup>1</sup> Л.С. Флейшман<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,  
119991 Москва, Россия

<sup>2</sup> Акционерное общество «Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского»,  
119071 Москва, Россия

<sup>3</sup> Российский государственный геологоразведочный университет им. С. Орджоникидзе,  
117997 Москва, Россия

e-mail: malginovva@lebedev.ru

Поступило в Редакцию 19 сентября 2018 г.

В окончательной редакции 22 октября 2018 г.

Принято к публикации 15 апреля 2019 г.

Рассмотрено применение высокотемпературных сверхпроводниковых резисторов (ВТСП резисторов) для защиты электрооборудования и сетей переменного тока от аварийных токов короткого замыкания и однофазного замыкания на землю. Для повышения быстродействия и термической стойкости ВТСП токоограничивающих устройств предложено применять стабильный перегруженный режим в композитных ВТСП проводах. Разработаны схемные решения по применению низкоомных стабилизированных ВТСП проводов в защитных резисторах для сетей переменного тока, позволяющие на несколько порядков повысить вносимое в цепь активное сопротивление. Приведены результаты измерения характеристик ВТСП проводов первого поколения с высокими критическими параметрами в резистивном состоянии в широком диапазоне токовых перегрузок. Изготовлены и испытаны макетные образцы безынерционных термически стойких токоограничивающих устройств с ВТСП защитными резисторами. Приведены расчетные значения конструктивных параметров ВТСП защитных резисторов для применения в электрических сетях.

**Ключевые слова:** высокотемпературный сверхпроводник, защитный резистор, резистивное состояние, переходный процесс, ограничение аварийного тока.

DOI: 10.21883/JTF.2019.12.48482.344-18

### Введение

Высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) и токонесущие элементы (ТНЭ) на их основе могут применяться в электроэнергетическом оборудовании не только с целью снижения потерь при генерации, передаче и преобразовании электроэнергии, но и в качестве исполнительных элементов в токоограничивающих устройствах (ТОУ) различных конструкций [1]. Принцип действия так называемых резистивных ВТСП ТОУ основан на переходе ВТСП ТНЭ в нормальное состояние вследствие его нагрева аварийным током короткого замыкания (КЗ), превышающим критический ток ВТСП элемента. Для эффективного ограничения токов КЗ в подобных ТОУ применяются ВТСП провода, в которых отсутствуют как матрица из серебра, так и стабилизирующее покрытие из меди, что позволяет достичь требуемого значения сопротивления ВТСП ТНЭ в нормальном состоянии. Однако при этом должны быть приняты меры для защиты самого сверхпроводника от перегорания после потери сверхпроводимости, тем более что нормальная зона в таких ВТСП проводах локализуется на коротком участке провода, а возрастание температуры достигает нескольких сотен градусов [2–4]. Соответственно в состав резистивных ВТСП ТОУ входит быстродей-

ствующая система отключения протекающего в ВТСП тока совместно с системой управления, что значительно усложняет конструкцию, приводит к увеличению стоимости ТОУ и снижению его надежности. Кроме того, разогрев ВТСП элемента приводит после окончания режима КЗ к наличию временного периода возврата ВТСП ТОУ в исходное состояние (т.е. инерционности [5,6]), длительность которого не должна превышать значения, задаваемого применением автоматического повторного включения (АПВ) в электрических сетях [7].

Если ВТСП провод имеет матрицу или стабилизирующий слой из нормально проводящего металла, то в таких стабилизированных проводах при охлаждении жидким азотом возможно существование стабильного перегруженного режима [8–10]. В этом режиме даже при протекании по ВТСП проводу тока, в несколько раз превышающего критический ток, температура его нагрева существенно ниже критической температуры ВТСП материала, а сверхпроводник переходит не в нормальное, а в так называемое резистивное состояние. В резистивном состоянии ВТСП ТНЭ при охлаждении жидким азотом может находиться неограниченно долго, а его возврат в сверхпроводящее состояние после снятия токовой перегрузки происходит безынерционным образом. Естественно, что низкоомность стабилизированных

ВТСП проводов создает значительные трудности для их использования в ТООУ при принятых в электроэнергетике классах напряжения. В настоящей работе впервые предлагается применить стабильный перегруженный режим в ВТСП токоограничивающих защитных резисторах непосредственно в составе ВТСП электрооборудования, приводятся физические основы работы таких резисторов, их преимущества и возможные применения в электрических сетях.

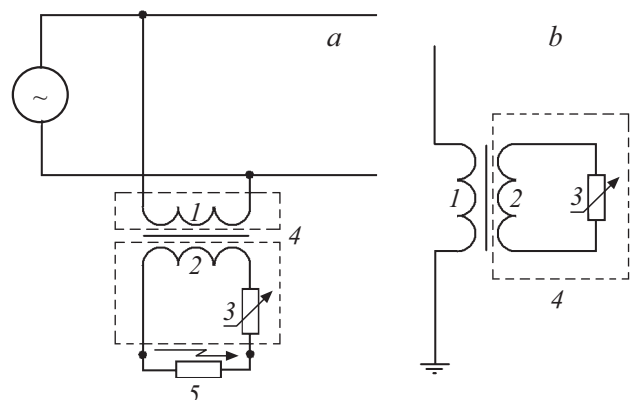
## 1. Схемные решения по применению ВТСП резисторов в электросетевом оборудовании

Отмеченная выше низкоомность стабилизированных ВТСП проводов в режиме потери сверхпроводимости затрудняет их применение для ограничения токов КЗ в электрических сетях и устройствах, однако не исключает возможности таких применений. В первую очередь это относится к сетям переменного тока, поскольку при использовании трансформаторных схем включения ВТСП провода в цепь переменного тока его активное сопротивление замещается так называемым вносимым сопротивлением [11,12]. При этом величина вносимого сопротивления определяется параметрами трансформаторной схемы и может на несколько порядков превосходить собственное сопротивление провода. Так, в работе [13] при подключении ВТСП резистора с сопротивлением в стабильном резистивном режиме не более  $2\text{ м}\Omega$  к концам вторичной обмотки трансформатора полное входное сопротивление схемы (внесенное в первичную цепь) в режиме токоограничения составило около  $5\ \Omega$ . При правильном выборе трансформаторной схемы и согласовании ее с параметрами ВТСП резистора последний может выполнять функцию защиты электросетевого оборудования от токовых перегрузок при возникновении КЗ, что оправдывает использование для его обозначения термина „защитный резистор“ (ЗР) в последующем изложении.

Рассмотрим в качестве примера две возможные схемы включения ЗР в электросетевом оборудовании, приведенные на рис. 1. Для изображения ВТСП ЗР использовано условное обозначение нелинейного резистора, поскольку он является таковым в силу своей вольт-амперной характеристики (ВАХ) [13]. Первая из схем (рис. 1, *a*) соответствует включению ВТСП резистора во вторичную цепь ВТСП трансформатора последовательно с нагрузкой, питаемой этим трансформатором (для упрощения на рисунке изображена одна фаза трансформатора). ВТСП защитный резистор полностью размещен в криогенной зоне, благодаря чему уменьшается количество криогенных токовых вводов при подключении ЗР [14]. Это позволяет существенно снизить теплопритоки в криогенную зону, которые в токовых вводах не могут быть сделаны ниже определенного минимального

значения [15] и с неизбежностью присутствуют в разрабатываемых в настоящее время резистивных ВТСП ТООУ [1]. В описываемой схеме ВТСП ЗР выполняет функцию защиты обмоток ВТСП трансформатора, участка линии электропередачи от источника переменного тока до этого трансформатора, а также самого источника от токовых перегрузок, обусловленных КЗ в цепи нагрузки трансформатора. Следует отметить, что непосредственно ВТСП обмотки трансформатора в общем случае не могут выполнять функцию ЗР по следующим причинам: во-первых, число витков в обмотках, а следовательно, длина обмоточного ВТСП провода определяется номинальными параметрами трансформатора, габаритами и магнитными свойствами магнитопровода, так что, вообще говоря, эта длина не удовлетворяет условиям, обеспечивающим ограничение тока КЗ при заданных первичном и вторичном напряжениях. Во-вторых, для достижения высокой энергоэффективности необходимо добиваться снижения потерь в обмотках трансформатора, в том числе вихревых потерь в переменном магнитном поле рассеяния. Для этого в качестве обмоточных проводов следует применять ВТСП материалы без низкоомной матрицы (ВТСП 2-го поколения) с минимальным сечением стабилизирующего слоя или вообще без такового [16,17]. На таких ВТСП проводах невозможно с требуемой надежностью реализовывать стабильное перегруженное состояние [2–4].

На второй схеме (рис. 1, *b*) необходимо остановиться более подробно. Прежде всего следует отметить, что она предназначена для заземления нейтрали электрической сети через ВТСП ЗР и представляет собой подключение ЗР на стороне низкого напряжения специального однофазного присоединительного трансформатора [12,18]. Первичная обмотка указанного трансформатора включается последовательно в соединение нейтрали сети с землей. Если нейтральная точка в сети физически



**Рис. 1.** Принципиальные схемы применения ВТСП ЗР в электрооборудовании: *a* — во вторичной цепи ВТСП трансформатора; *b* — в схеме заземления нейтрали электрической сети: 1 — первичная обмотка, 2 — вторичная обмотка, 3 — ВТСП ЗР, 4 — криостат, 5 — нагрузка.

отсутствует, то такое включение следует выполнять посредством трансформатора вывода нейтрали [19].

Технические требования к однофазному присоединительному трансформатору приведены в [12]. Принцип действия схемы, изображенной на рис. 1, *b*, не накладывает требований по применению сверхпроводимости в присоединительном трансформаторе; тем не менее во избежание теплопритоков через токовводы в криогенную зону желательно выполнять его вторичную обмотку из ВТСП материалов и размещать ее с присоединенным ВТСП ЗР в единой криостатирующей оболочке.

Необходимость применения особой схемы заземления нейтрали электрической сети обусловлена тем, что при однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ) режимы заземления нейтрали определяют происходящие электромагнитные процессы, степень опасности ОЗЗ и ущербы от их последствий, требования к защите от ОЗЗ и принципы ее выполнения. При этом существенно, что ОЗЗ являются преобладающим видом повреждений в электрических сетях среднего напряжения и часто являются первопричиной аварий, сопровождающихся значительным ущербом [20].

Детальное исследование режимов заземления нейтрали в сетях среднего напряжения [18–20] показывает, что наиболее благоприятным с точки зрения их эксплуатации является глухое либо низкоомное заземление в нормальном режиме и заземление через реактор и/или резистор во время ОЗЗ. Для осуществления такого режима предлагается при возникновении ОЗЗ подключать к реактору шунтирующий резистор [19] или ЗР [18] с заданным сопротивлением с помощью специальной быстродействующей системы управления (так называемый управляемый ЗР). Такой резистор должен удовлетворять требованиям по термической стойкости [21], обусловленным джоулевыми тепловыделениями в режиме ОЗЗ: в [19] указано время термической стойкости от 6 до 60 с, в [12] это время должно составлять 300 с.

В настоящей работе предлагается для осуществления вышеописанного режима заземления нейтрали использовать ЗР из ВТСП провода. Это позволит обеспечить низкоомное заземление в нормальном режиме сети, быстродействующее ограничение токов ОЗЗ без дополнительной системы управления, безынерционность срабатывания и возврата в исходное состояние, термическую стойкость без ограничения длительности работы в режиме ОЗЗ.

И в той, и в другой схемах (рис. 1) ВТСП резистор предназначен для внесения в цепь дополнительного активного сопротивления, причем только в режиме ограничения токов КЗ/ОЗЗ. Поэтому резистор следует выполнять бифилярной намоткой. Кроме того, для снижения гистерезисных потерь в сверхпроводнике и вихревых потерь в низкоомной матрице и/или стабилизирующем слое ВТСП ЗР следует размещать за пределами канала рассеяния трансформатора.

Внесение дополнительного активного сопротивления в цепь, в которой происходит обусловленный КЗ/ОЗЗ

переходный процесс, приводит также к демпфированию апериодической составляющей тока КЗ. Для количественного описания этого эффекта в последующем изложении использованы термины „ударный ток КЗ“ и „ударный коэффициент тока КЗ“, определения которых (в числе прочих терминов) приведены в [22]. Если вносимое активное сопротивление достаточно велико, то ударный коэффициент  $K \approx 1$  (полное демпфирование апериодической составляющей тока КЗ); в противном случае  $K \approx 2$  (отсутствие демпфирования). Активное сопротивление обмоток силовых трансформаторов и прочего электрооборудования переменного тока имеет весьма малую величину не только в сверхпроводниковом, но и в традиционном исполнении. Это приводит к появлению значительных ударных токов КЗ и к затягиванию переходных процессов, что может привести к повреждениям оборудования и выходу его из строя. Таким образом, ВТСП ЗР с параметрами, соответствующими параметрам оборудования, в котором он применяется, способен выполнять как функцию ограничения ударного и установившегося тока КЗ, так и демпфирования его апериодической составляющей.

## 2. Характеристики ВТСП проводов при токовой перегрузке

В качестве материалов для изготовления ВТСП ЗР были выбраны ВТСП провода первого поколения (1G). Такой выбор обусловлен следующими обстоятельствами. Во-первых, критическая температура 1G ВТСП проводов достаточно высока (около 110 К), так что в них резистивное состояние при токовой перегрузке обладает большим запасом стабильности, чем в ВТСП второго поколения. Во-вторых, возможные локальные неоднородности/дефекты отдельных сверхпроводниковых жил в 1G ВТСП не распространяются на полное поперечное сечение провода, тогда как в проводах второго поколения дефект тонкопленочного ВТСП слоя с неизбежностью приводит к возникновению „слабого места“, в котором происходит ускоренное образование нормальной зоны.

Для изучения переходных процессов использовались 1G материалы, производимые Sumitomo Electric. Они представляют собой ленточные композитные многожильные провода шириной 4 мм и толщиной 0,2 мм с жилами из ВТСП соединения  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$  в серебряной матрице (провод типа *H* по классификации производителя). Предварительные измерения сопротивления образцов провода при комнатной температуре показали, что серебряная матрица занимает около 60% сечения образца. Заявленный производителем и подтвержденный испытаниями критический ток провода при температуре жидкого азота составлял 180–200 А.

Испытания при нагружении транспортным током проводились на двух образцах различной длины.

Первый образец длиной 14 см имел форму петли. На нем изучались процессы в таких ВТСП ЗР, в полном

сопротивлению которых присутствует значительная индуктивная составляющая, а поверхность провода беспрепятственно омывается жидким азотом.

Второй образец длиной 306 см представлял собой длинномерный бифилярный ВТСП ЗР. Между образующими бифиляр ленточными проводами размещалась электрическая изоляция, при выборе которой особое внимание уделялось созданию наилучших условий теплоотвода с поверхности провода в жидкий азот. Поскольку сплошной тонкий слой электрической изоляции на поверхности провода сужает диапазон существования стабильного перегруженного режима [2,13,21], между бифилярными лентами была проложена сетка из стекловолокна толщиной 0.1 мм. Бифилярная часть ленты наматывалась на три пластиковых цилиндра, диаметром 60 мм каждый. Для лучшего охлаждения ленты в местах ее прилегания к поверхностям цилиндров последние были покрыты двумя слоями сетки из стекловолокна. При этом внешняя поверхность лент омывалась жидким азотом. На этом образце имелись не бифилярные участки общей длиной около 30 см, обусловленные соединением с токовводами и образованием при формировании бифиляра петли в середине провода с диаметром изгиба около 6 см.

Для экспериментального исследования электрических процессов в ВТСП лентах в режиме токовой перегрузки была применена методика измерений на переменном токе частотой 50 Hz [2]. Выбор переменного тока для измерений ВАХ образцов композитных ВТСП лент обусловлен тем, что такие образцы являются весьма низкоомными: даже после потери сверхпроводимости их сопротивление не превышает нескольких миллиом на метр длины. При таких условиях любой источник постоянного тока поддерживает неизменной величину тока в ленте, что приводит при потере сверхпроводимости к ее значительному нагреву и скачкообразному возрастанию напряжения на образце. Этого удастся избежать при измерениях на переменном токе посредством включения между источником и образцом ВТСП ленты специального согласующего трансформатора. При надлежащем выборе коэффициента трансформации переход образца в несверхпроводящее состояние сопровождается переходом измерительной схемы в режим источника заданного напряжения. При этом ток в образце плавно понижается, что позволяет проследить ВАХ образца без скачков напряжения и тока.

Результаты измерений амплитудных ВАХ [5,6] обоих образцов приведены на рис. 2 и 3. Наклон начального прямолинейного участка ВАХ связан с индуктивной и контактной составляющими полного сопротивления (кривые 2 на рис. 2 и 3). Индуктивное сопротивление определяется небифилярной частью образца. Для длинномерных ТНЭ с типичной протяженностью небифилярной части около 30 см индуктивное и контактное сопротивление в сверхпроводящем состоянии (кривая 2 на рис. 3) будет составлять не более 0.1 мΩ на переменном токе промышленной частоты. Активное со-

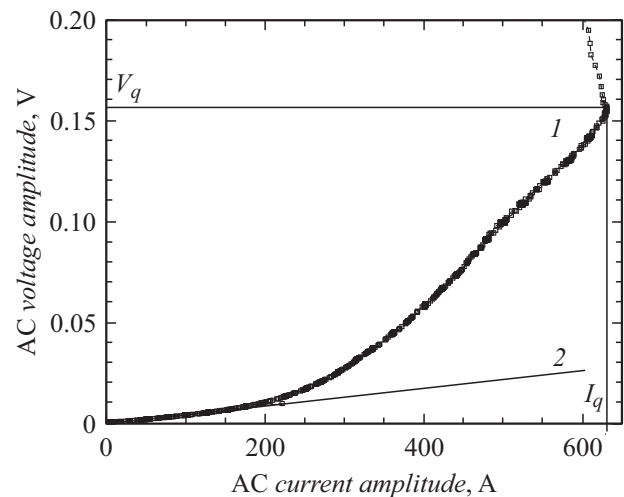


Рис. 2. Амплитудная ВАХ на переменном токе образца 1G ВТСП провода длиной 14 см: 1 — результат измерений, 2 — экстраполяция начального участка.

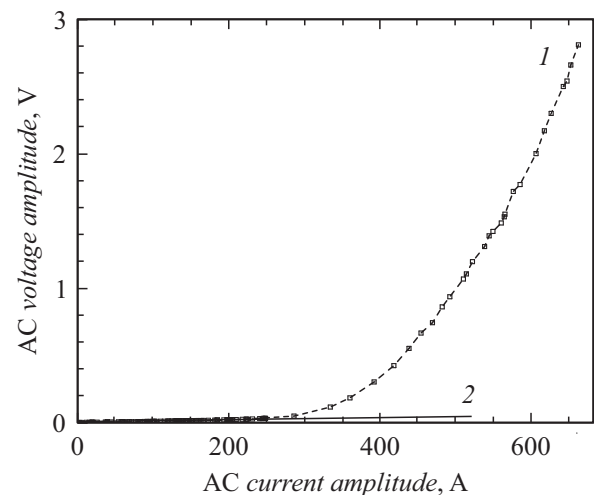
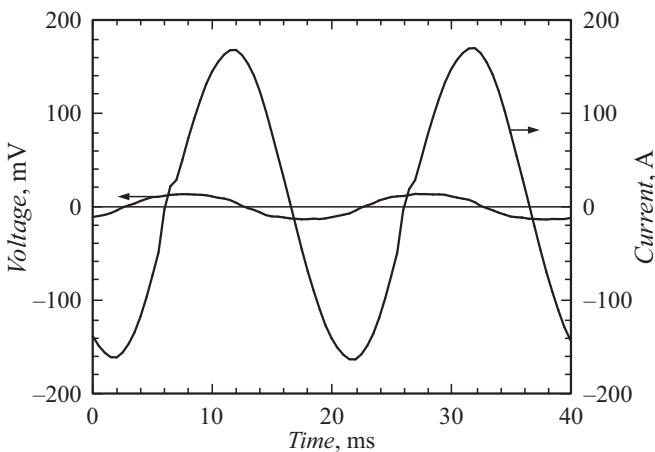
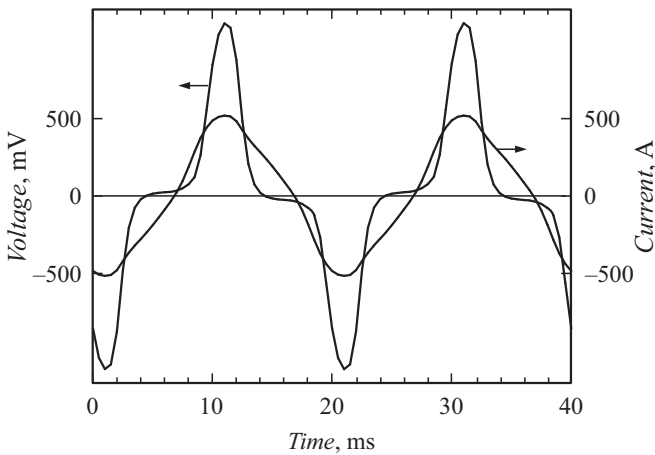


Рис. 3. То же, что на рис. 2 для провода длиной 306 см.

противление в резистивном состоянии пропорционально длине ТНЭ и увеличивается с ростом тока. Максимального значения оно достигает в точке теплового срыва стабильного состояния (квенча). На рис. 2 значения амплитуд тока и напряжения, соответствующие квенчу, имеют обозначения  $I_q$  и  $V_q$ . В ленточных 1G ВТСП проводах шириной 4 мм квенч происходит при амплитуде тока около  $I_q \approx 600$  А и средней (по длине провода) амплитуде напряженности электрического поля не менее  $E_q \approx 0.8$  В/м. Эти значения указанных величин определяются предельными возможностями теплоотвода в жидкий азот при пузырьковом кипении на тонких металлических пластинах (порядка  $(0.7-1.0) \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>) [9]. Таким образом, наибольшее активное сопротивление (на единицу длины) 1G ВТСП провода шириной 4 мм в резистивном состоянии достигает 1.33 мΩ/м.



**Рис. 4.** Осциллограммы напряжения и тока в образце 1G ВТСП провода длиной 306 см при амплитуде тока, меньшей критического значения.



**Рис. 5.** Осциллограммы напряжения и тока в образце 1G ВТСП провода длиной 306 см при амплитуде тока, большей критического значения, но меньшей тока теплового срыва.

На бифилярном образце длиной 306 см изучались временные зависимости тока и напряжения в течение нескольких периодов стабильного режима, в котором никаких изменений установившегося процесса не происходит при произвольной длительности наблюдений. На рис. 4 приведены осциллограммы при амплитуде тока, меньшей критического тока ВТСП провода. Характер сдвига фаз между током и напряжением указывает на преобладание индуктивной составляющей полного сопротивления. На рис. 5 показаны осциллограммы тока и напряжения в перегруженном режиме, когда амплитуда тока значительно превышает критическую, но несколько меньше, чем ток теплового срыва  $I_q$ . Из рисунка следует, что в тех частях периода, в которых ток не превышает критического значения, напряжение на проводе имеет индуктивный характер. По мере возрастания тока во времени после прохождения нулевого значения возникает активная составляющая напряжения, которая достигает

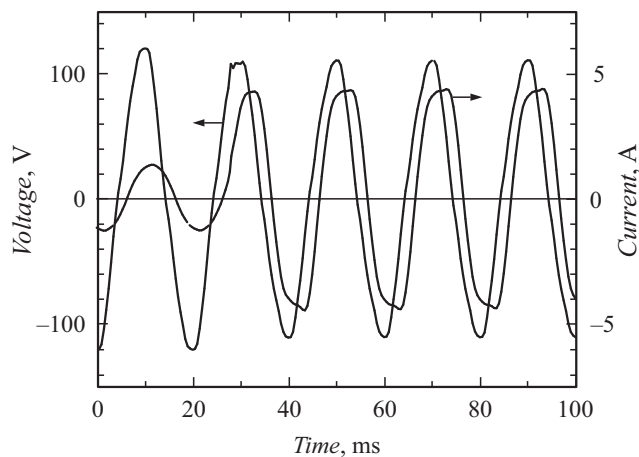
максимума при амплитудном значении тока. Полное напряжение определяется сложением активной и индуктивной составляющих, что вносит асимметрию в кривую напряжения относительно горизонтальной оси. Тот факт, что активная составляющая напряжения исчезает всякий раз при прохождении током окрестности нулевого значения, указывает на электромагнитный механизм возникновения активного сопротивления ВТСП провода, при котором нагрев не играет заметной роли. Следует подчеркнуть, что выбранный способ электрической изоляции бифилярных слоев с помощью диэлектрической сетки позволяет осуществить эффективный теплоотвод от ВТСП ленты, благодаря которому электромагнитный механизм формирования ВАХ имеет место вплоть до тока теплового срыва.

### 3. Экспериментальное исследование работы макетов электрооборудования с применением ВТСП ЗР

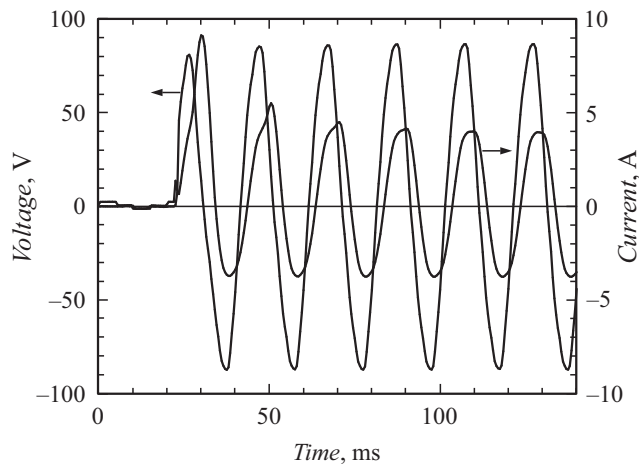
С целью экспериментальной проверки возможности применения ВТСП ЗР в электрооборудовании были изготовлены лабораторные макеты ТОО трансформаторного типа малой мощности (до 1 kVA), на которых исследовались переходные и установившиеся процессы в цепи переменного тока промышленной частоты при возникновении КЗ/ОЗЗ. Задача достижения максимальной энергоэффективности в этих экспериментах не ставилась, поэтому обмотки трансформаторов были выполнены из медных проводов, а в криостатирующей оболочке с жидким азотом размещались только ВТСП ЗР, соединенные с другими элементами схемы с помощью тоководов. Конструкция макетов ТОО позволяла реализовывать обе описанные в разд. 1 схемы включения ВТСП ЗР (рис. 1). Возникновение и прекращение режимов КЗ/ОЗЗ имитировалось посредством замыкания и размыкания соответствующих элементов схемы специальными выключателями.

На рис. 6 и 7 приведены полученные в экспериментах типичные осциллограммы переходных процессов при имитации замыкания в цепях переменного тока, включающих в себя макеты ТОО с ВТСП ЗР, которые реализуют схемы, изображенные на рис. 1. На этих осциллограммах показаны временные зависимости входного напряжения на ТОО (т.е. напряжения на первичной обмотке соответствующего трансформатора) и тока в защищаемом участке цепи. После возникновения замыкания амплитуда тока на обеих осциллограммах значительно возрастает. Что касается переходных процессов по напряжению, то наблюдается существенное различие, обусловленное разницей в назначении и схемной реализации ТОО: в первом случае (схема — рис. 1, а, осциллограмма — рис. 6) амплитуда первичного напряжения после КЗ нагрузки лишь незначительно понижается,





**Рис. 6.** Осциллограммы напряжения и тока в первичной обмотке трансформатора при КЗ нагрузки во вторичной цепи схемы, изображенной на рис. 1, *a*. Замыкание нагрузки произведено в момент времени 28 ms.



**Рис. 7.** Осциллограммы напряжения и тока в первичной обмотке трансформатора при подаче первичного напряжения на схему, изображенную на рис. 1, *b*.

поскольку входное напряжение трансформатора определяется главным образом напряжением линии электропередачи, в которой он установлен. Во втором случае (схема — рис. 1, *b*, осциллограмма — рис. 7), соответствующем возникновению ОЗЗ, напряжение на ТОО возрастает от незначительной величины до значения напряжения защищаемой линии. Это естественным образом объясняется тем, что в нормальном режиме сети напряжение на нейтрали (с низкоомным заземлением) близко к нулю; при возникновении ОЗЗ напряжение на нейтрали возрастает (его конкретное значение определяется характером замыкания и параметрами линии [7] и может достигать величины фазного напряжения).

Общей и самой существенной особенностью временных зависимостей тока в первичной обмотке трансформатора (а следовательно, и в защищаемой линии)

в обеих схемах (рис. 1) является срезание вершин синусоиды тока в каждом полупериоде в установившемся режиме КЗ/ОЗЗ. Так, амплитуда установившегося тока КЗ на рис. 6 почти в два раза меньше, чем амплитуда ожидаемого тока КЗ (т.е. тока КЗ, который был бы в электрической цепи при отсутствии действия ТОО [22]). Это означает, что, во-первых, исследованные макеты ВТСП ТОО действительно выполняют ограничение аварийного тока КЗ и, во-вторых, делают это безынерционным образом: согласно принятой классификации [11] резисторы, нелинейность ВАХ которых обусловлена нетепловыми процессами, принято называть безынерционными, причем величина их сопротивления определяется мгновенным значением переменного тока.

В переходных процессах по току, происходящих в рассматриваемых схемах, наблюдается и принципиальное различие: на осциллограммах тока в схеме рис. 1, *b*, вообще говоря, присутствует аперриодическая составляющая тока КЗ (рис. 7), а при работе схемы рис. 1, *a* аперриодическая составляющая тока всегда отсутствует (рис. 6). Такая особенность переходных процессов в этих схемах естественным образом обусловлена их назначением и принципом действия (см. разд. 4).

Обе схемы выдерживают работу в режиме токоограничения неограниченное время и после окончания режима КЗ демонстрируют безынерционный возврат в исходное состояние [23].

#### 4. Параметры ВТСП ЗР для электрических сетей среднего напряжения

Результаты экспериментов, приведенные в разд. 2 и 3, можно использовать для оценки параметров 1G ВТСП ЗР для сетей переменного тока среднего напряжения. Такие оценки проведены ниже на примере электрической сети 10 kV.

При применении ВТСП ЗР во вторичной цепи трехфазного распределительного трансформатора номинальной мощностью 1 MVA, напряжением 10/0.4 kV (рис. 1, *a*) и схемой соединения обмоток треугольник-звезда амплитуда напряжения на ЗР при КЗ нагрузки составит около  $\sqrt{2} \cdot 230$  V. Это напряжение при учете указанного в разд. 2 предельно допустимого значения  $E_q$  определяет минимальную суммарную длину обеих составляющих бифилярного ВТСП ТНЭ, которая, таким образом, приближенно равна 400 m. В нормальном режиме работы трансформатора (т.е. режиме, при котором его параметры отклоняются от номинальных не более, чем это допускается техническими условиями [24]) ТНЭ резистора и вторичной обмотки должны без потери сверхпроводимости пропускать не только номинальный вторичный ток амплитудой 2 kA [16], но и выдерживать перегрузку, максимальная величина которой составляет 100% от номинальной нагрузки [24]. Следовательно, критический ток ВТСП ЗР должен составлять 4 kA.

Это означает, что при критическом токе ВТСП провода 200 А (для 1G провода шириной 4 мм) ТНЭ должен содержать 20 параллельно соединенных бифилярных проводов; таким образом, при номинальном токе трансформатора в каждом из ВТСП проводов будет протекать ток 100 А. Конструкция аналогичного ТНЭ, обеспечивающая равномерное распределение переменного тока в проводах и его приспособленность для размещения на стержне ВТСП трансформатора, описана в [17].

Основываясь на приведенных в [16] параметрах опытного образца ВТСП трансформатора и данных о полном сопротивлении ВТСП провода в сверхпроводящем состоянии (разд. 2), можно заключить, что в нормальном режиме работы вносимое в первичную цепь сопротивление ВТСП ЗР будет на три порядка меньше, чем индуктивное сопротивление рассеяния обмоток  $X$ , равное  $X \approx 9.9 \Omega$  (его величину нетрудно получить, зная номинальное напряжение трансформатора — 10 кВ, номинальную мощность — 1 МВА и приведенное в [16] значение параметра ВТСП трансформатора, непосредственно связанного с индуктивным сопротивлением рассеяния [25], а именно напряжения КЗ — 3.3%). Поэтому ВТСП ЗР не будет оказывать влияние на работу трансформатора в нормальном режиме.

При КЗ нагрузки в ВТСП трансформаторе, не оснащенном ЗР [16], ожидаемый ток КЗ (т.е. ток, который должен возникнуть в отсутствие токоограничения [22]) составит около 30-кратного номинального тока. При применении ВТСП ЗР активное сопротивление ТНЭ в резистивном состоянии может достигнуть значения  $1.33 \text{ м}\Omega/\text{м} \cdot 400 \text{ м}/20 = 26.6 \text{ м}\Omega$ ; вносимое в первичную цепь сопротивление  $R$ , рассчитанное, согласно [11], достигнет при этом  $R \approx 50 \Omega$ . В случае КЗ кратность возрастания тока в каждом из параллельных бифилярных ВТСП проводов в составе ТНЭ не превысит  $600 \text{ А}/100 \text{ А} = 6$ , что справедливо также для ВТСП ЗР в целом. Тем самым применение ВТСП ЗР позволит в 5 раз снизить значение аварийного тока в обмотках трансформатора и в линии электропередачи при КЗ в цепи нагрузки.

Параметры ВТСП ЗР для применения в схеме заземления нейтрали электрической сети (рис. 1, б) определяются требованием ограничения до 20 А остаточного тока ОЗЗ для сети 10 кВ [18]. Поскольку амплитуда тока в 1G ВТСП проводе не должна превысить 600 А, то для коэффициента трансформации присоединительного трансформатора получается значение  $600 \text{ А}/(\sqrt{2} \cdot 20 \text{ А}) \approx 21$ . Учитывая, что, как указано выше, напряжение на нейтрали при ОЗЗ может достигать фазного напряжения сети (5.8 кВ), для амплитуды вторичного напряжения присоединительного трансформатора получаем наибольшее достижимое значение 390 В. Отсюда следует, что бифилярный ВТСП ТНЭ для рассматриваемого применения может состоять из одиночного 1G провода шириной 4 мм и длиной 490 м. Активное сопротивление такого ТНЭ в резистивном режиме может достигать 0.65 Ом, при этом вносимое

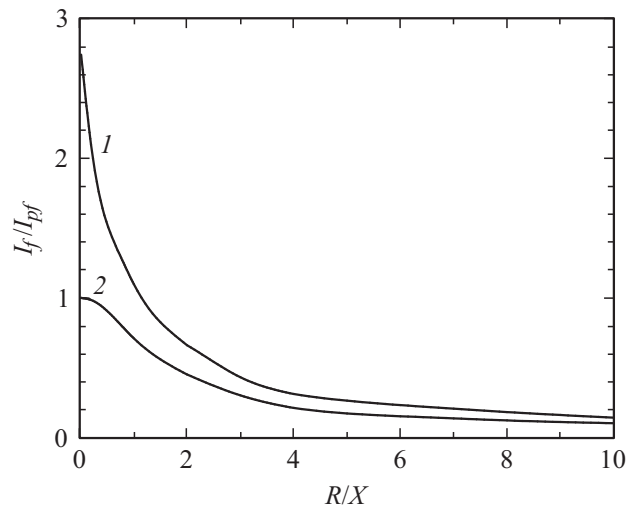


Рис. 8. Расчетные зависимости токов КЗ  $I_f$ , нормированных на ожидаемый ток КЗ  $I_{pf}$ , от величины отношения  $R/X$ : 1 — ударный ток, 2 — установившийся ток.

в первичную цепь сопротивление, рассчитанное, согласно [11], при указанном выше значении коэффициента трансформации, составит  $R \approx 290 \Omega$ .

В проведенных выше оценках возможное наличие ударного тока КЗ не было принято во внимание. Допустимость этого обосновывается ниже посредством оценок возможных значений ударного коэффициента (отношение ударного тока к амплитуде периодической составляющей тока КЗ [22]), которые непосредственно связаны с демпфированием аperiodической составляющей тока КЗ (см. разд. 1).

Поведение аperiodической составляющей тока КЗ в каждой из рассматриваемых схем (рис. 1) определяется соотношением в них активного  $R$  и индуктивного  $X$  сопротивлений. В первом случае (рис. 1, а) речь идет о распределительном трансформаторе, у которого при замыкании нагрузки (во вторичной цепи) значение  $R$  будет задаваться вносимым активным сопротивлением ВТСП ЗР в резистивном состоянии, а значение  $X$  — индуктивным сопротивлением рассеяния обмоток [25]. На рис. 8 приведены расчетные зависимости ударного и установившегося (действующее значение) токов КЗ  $I_f$  (эти токи нормированы на ожидаемый ток КЗ  $I_{pf}$ ) от величины отношения  $R/X$ . Расчеты выполнены в приближении линейной электрической цепи с использованием методик, приведенных в [22]. Поскольку в распределительных трансформаторах класса напряжения 10 кВ значение  $X$  на 3–4 порядка меньше, чем индуктивное сопротивление первичной обмотки при холостом ходе  $X_0$  [16,25], а первичное напряжение при КЗ нагрузки несущественно отличается от номинального напряжения сети, то при определенных выше параметрах ВТСП ЗР достижимы значения  $R/X \approx 50 \Omega/9.9 \Omega \approx 5$ . Расчетный ударный коэффициент при этом практически не отличается от единицы (на рис. 8 это соответствует разли-

анию ударного и установившегося токов в  $\sqrt{2}$  раз), так что апериодическая составляющая тока КЗ полностью демпфируется. Аналогичная ситуация имеет место и в описанных в разд. 3 экспериментах: на осциллограмме тока (рис. 6) апериодическая составляющая отсутствует.

Во втором случае (рис. 1, *b*) напряжение на первичной обмотке присоединительного трансформатора определяется потенциалом нейтрали сети относительно земли, который зависит от сопротивления в месте ОЗЗ и может принимать значения от нуля до фазного напряжения линии [7]. При промежуточном значении первичного напряжения, меньшем фазного напряжения, активное сопротивление ВТСП ЗР в резистивном состоянии также меньше предельного значения, достижимого при заданной длине ВТСП провода. В частности, отношение  $R/X$  в условиях эксперимента по регистрации переходного процесса (рис. 7) оказывается недостаточным для полного исключения апериодической составляющей тока КЗ. Это соответствует диапазону  $R/X \leq 0.5$  на рис. 8, в котором расчетный ударный коэффициент принимает значения  $1.3 \leq K \leq 2.0$ . Наличие апериодической составляющей на осциллограмме тока (рис. 7) непосредственно связано с указанными обстоятельствами. Однако в случае реального применения ВТСП ЗР для заземления нейтрали сети (при учете значения  $X$  для присоединительного трансформатора  $X \approx 10 \text{ Ohm}$ ) отношение  $R/X$  при максимальном напряжении достигает  $R/X = 290 \text{ Ohm}/10 \text{ Ohm} \approx 30$ . Отсюда следует, что и при промежуточных значениях напряжения на нейтрали апериодическая составляющая тока будет эффективно демпфироваться. Содержащееся в [12] требование  $R/X > 0.5$  при указанных значениях параметров также заведомо выполняется.

## Заключение

В работе предлагается применять стабильный перегруженный режим в ВТСП проводах для выполнения с их помощью защиты электрооборудования и электрических сетей переменного тока от аварийных токов короткого замыкания и однофазного замыкания на землю. Этот режим существует в композитных стабилизированных ВТСП проводах при токовой нагрузке, значительно превышающей критический ток провода. Преимуществами применения стабильного перегруженного режима в ВТСП защитных резисторах являются безынерционность их срабатывания и возврата в исходное состояние, а также термическая стойкость. Благодаря этому устраняется необходимость быстрого отключения тока в сверхпроводнике, что позволит упростить конструкцию и повысить надежность работы ВТСП токоограничивающих устройств. Для получения требуемой величины полного сопротивления защитных устройств с использованием низкоомных стабилизированных ВТСП проводов предложено применять трансформаторные схемы включения ВТСП защитных резисторов, что позволяет

на несколько порядков повысить вносимое в первичную цепь активное сопротивление.

Проведенные в работе экспериментальные исследования на лабораторных макетах токоограничивающих устройств с защитными резисторами из ВТСП проводов первого поколения подтвердили эффективность ограничения аварийных токов и демпфирования апериодической составляющей, термическую стойкость и безынерционность их работы. На основании результатов экспериментов выполнены оценки конструктивных параметров ВТСП защитных резисторов для электрических сетей среднего напряжения.

## Благодарности

Авторы выражают благодарность В.М. Пудалову за постоянную поддержку выбранного направления изучения ВТСП материалов и за ряд ценных замечаний при подготовке настоящей работы.

## Финансирование работы

Работа выполнена на оборудовании ЦКП ФИАН, при финансовой поддержке программы фундаментальных исследований Президиума РАН „Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости“ и РФФИ в рамках научного проекта № 17-29-10003.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] *Meerovich V., Sokolovsky V.* Superconductors in the Power Grid: Materials and Applications Ed. by C. Rey. Cambridge: Elsevier, 2015. P. 283–324. DOI: 10.1016/B978-1-78242-029-3.00009-1
- [2] *Мальгинов А.В., Кунцевич А.Ю., Мальгинов В.А., Флейшман Л.С.* // ЖЭТФ. 2013. Т. 144. Вып. 6. С. 1225–1238. DOI: 10.7868/S0044451013120110 [*Malginov A.V., Kuntsevich A.Yu., Malginov V.A., Fleishman L.S.* // J. Exp. Theor. Phys. 2013. Vol. 117. N 6. P. 1078–1090. DOI: 10.1134/S106377611314015X]
- [3] *Malginov A.V., Kuntsevich A.Yu., Malginov V.A., Fleishman L.S.* // Springer Plus. 2013. 2: 535. P. 1–3. DOI: 10.1186/2193-1801-2-535
- [4] *Malginov V.A., Malginov A.V., Fleishman L.S.* // Springer Plus. 2013. 2: 599. P. 1–4. DOI: 10.1186/2193-1801-2-599
- [5] *Волков Э.П., Флейшман Л.С., Мальгинов В.А., Мальгинов А.В.* // Изв. РАН. Энергетика. 2009. № 2. С. 64–76.
- [6] *Fleishman L.S., Volkov E.P., Malginov V.A., Malginov A.V., Kuntsevich A.Yu., Sheynshiteyn A.S.* // IEEE Tr. Appl. Supercond. 2011. Vol. 21. N 3. P. 1263–1266. DOI: 10.1109/TASC.2010.2099632
- [7] *Электрическая часть станций и подстанций: Учеб. для вузов / Под ред. А.А. Васильева. М.: Энергоатомиздат, 1990. 576 с.*



- [8] Романовский В.Р. // ЖТФ. 2015. Т. 85. Вып. 1. С. 87–97. [Romanovskii V.R. // Tech. Phys. 2015. Vol. 60. N 1. P. 86–95. DOI: 10.1134/S106378421501020X]
- [9] Мальгинов В.А., Мальгинов А.В., Флейшман Л.С., Ракитин А.С. // ЖТФ. 2017. Т. 87. Вып. 10. С. 1509–1517. DOI: 10.21883/JTF.2017.10.44995.2077 [Malginov V.A., Malginov A.V., Fleishman L.S., Rakitin A.S. // Tech. Phys. 2017. Vol. 62. N 10. P. 1516–1524. DOI: 10.1134/S1063784217100176]
- [10] Мальгинов В.А., Мальгинов А.В., Горбунова Д.А. // ЖТФ. 2018. Т. 88. Вып. 5. С. 733–739. DOI: 10.21883/JTF.2018.05.45902.2419 [Malginov V.A., Malginov A.V., Gorbunova D.A. // Tech. Phys. 2018. Vol. 63. N 5. P. 711–717. DOI: 10.1134/S106378421805016X]
- [11] Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. М.: Высшая школа, 1996. 638 с.
- [12] Heathcote M.J. The J & P Transformer Book: A Practical Technology of the Power Transformer. Oxford: Newnes, 1998. 945 p.
- [13] Лутидзе Ш.И., Флейшман Л.С., Мальгинов В.А., Мальгинов А.В. и др. // Инженерная физика. 2004. № 2. С. 22–30.
- [14] Флейшман Л.С., Мальгинов В.А., Мальгинов А.В. // Изв. РАН. Энергетика. 2010. № 5. С. 61–67. [Fleishman L.S., Malginov V.A., Malginov A.V. // Therm. Eng. 2010. Vol. 57. N 14. P. 1217–1222. DOI: 10.1134/S1063784217100176]
- [15] Глебов И.А., Шахтарин В.Н., Антонов Ю.Ф. Проблема ввода тока в сверхпроводниковые устройства. Л.: Наука, 1985. 208 с.
- [16] Волков Э.П., Джафаров Э.А., Флейшман Л.С., Высоцкий В.С., Суконкин В.В. // Изв. РАН. Энергетика. 2016. № 5. С. 45–56. [Volkov E.P., Dzhaфарov E.A., Fleishman L.S., Ysotsky V.S., Sukonkin V.V. // Therm. Eng. 2016. Vol. 63. N 13. P. 909–916. DOI: 10.1134/S0040601516130085]
- [17] Ysotsky V.S., Fetisov S.S., Zubko V.V. et al. // IEEE Tr. Appl. Supercond. 2017. Vol. 27. N 4. P. 5500105. DOI: 10.1109/TASC.2016.2639011
- [18] Рыжкова Е.Н. // Электричество. 2007. № 3. С. 16–20.
- [19] Титенков С.С., Пугачев А.А. // Энергоэксперт. 2010. № 2. С. 18–25.
- [20] Шун В.А., Гусенков А.В. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6–10 кВ. М.: НТФ „Энергопрогресс“, 2001. 104 с.
- [21] Флейшман Л.С. // Электрические станции. 2005. № 8. С. 71–75.
- [22] Крючков И.П., Старшинов В.А., Гусев Ю.П. и др. Короткие замыкания и выбор электрооборудования: учебное пособие для вузов / Под. ред. И.П. Крючкова, В.А. Старшинова. М.: Издат. дом МЭИ, 2012. 568 с.
- [23] Волков Э.П., Флейшман Л.С., Джафаров Э.А., Мальгинов В.А., Мальгинов А.В. // Сборник тезисов V Междунар. конф. „Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости“. М., Россия, 2015. С. 224–225.
- [24] Котеленец Н.Ф., Акимова Н.А., Антонов М.В. Испытания, эксплуатация и ремонт электрических машин. М.: Издат. центр „Академия“, 2003. 384 с.
- [25] Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. В 2-х т. М.: Изд-во МЭИ, 2004. Т. 1. 656 с.