

05.5

Стабилизация сверхпроводниковых защитных резисторов посредством сетчатой электрической изоляции

© В.А. Мальгинов¹, Л.С. Флейшман²¹ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия² Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе, Москва, Россия

E-mail: malginovva@lebedev.ru

Поступило в Редакцию 5 апреля 2023 г.

В окончательной редакции 21 апреля 2023 г.

Принято к публикации 22 апреля 2023 г.

Рассмотрена возможность применения высокотемпературных сверхпроводников второго поколения в защитных резисторах (ВТСП-резисторах) для электрооборудования. Предложено использовать в ВТСП-резисторах сетчатую стекловолоконную электрическую изоляцию для обеспечения эффективности теплоотвода и поддержания стабильного перегруженного режима. Выполнено физическое моделирование таких резисторов, которое показало сохранение их перегрузочной способности и подавление тепловых неустойчивостей благодаря наличию сетчатой изоляции.

Ключевые слова: высокотемпературный сверхпроводник, защитный резистор, сетчатая изоляция, хладагент, резистивное состояние, тепловой срыв.

DOI: 10.21883/PJTF.2023.12.55567.19579

Защитные резисторы из высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) предназначены для предотвращения выхода из строя электроэнергетического оборудования в аварийном режиме работы [1]. Как указано в [1], термин „защитный резистор“ используется потому, что такой резистор может выполнять функцию защиты электросетевого оборудования от токовых перегрузок. Он применяется в качестве элемента электротехнических устройств (схемы включения приведены [1]), но не является автономным сверхпроводящим ограничителем тока. Резистор изготавливается из сверхпроводника, поэтому он назван сверхпроводниковым, хотя в основе его работы лежит переход из сверхпроводящего в резистивное состояние. Принцип действия защитных ВТСП-резисторов основан на существовании стабильного перегруженного режима в ВТСП-проводах со стабилизирующим металлическим слоем/матрицей, охлаждаемых жидким хладагентом (азотом) [2]. Характерным признаком указанного режима является наличие у провода активного сопротивления одновременно с пребыванием ВТСП-слоя в резистивном состоянии. При этом температура провода превышает температуру хладагента, но не достигает критической температуры перехода ВТСП в нормальное состояние. ВТСП-резистор может находиться в стабильном перегруженном состоянии неограниченное время без деградации параметров [3], что исключает необходимость отключения тока с помощью быстродействующей системы противоаварийной защиты и автоматики.

В [1] описаны результаты экспериментов, проведенных на физических моделях электросетевого оборудования с применением защитных ВТСП-резисторов, изготовленных из ВТСП-проводов первого поколения

(1G). Такие провода обладают запасом стабильности при токовой перегрузке благодаря достаточно высокой критической температуре (110 К). Однако в силу технологических причин серебряная матрица занимает не менее 60% сечения 1G провода, что делает его резистивное состояние весьма низкоомным и тем самым приводит к увеличению потребного количества провода для выполнения защитных функций. Хотя ВТСП второго поколения (2G) имеют меньшую критическую температуру (92 К), но в них медный стабилизирующий слой может быть выполнен с заданной толщиной от единиц до десятков микрон в соответствии с предварительно проведенным расчетом параметров ВТСП-резистора [4]. Поэтому в настоящей работе была поставлена цель обосновать возможность применения изолированных 2G ВТСП-проводов в защитных резисторах. Для достижения этой цели необходимо решить задачу о наложении на ВТСП-провод такой электрической изоляции, которая не приводила бы к снижению его перегрузочной способности из-за ухудшения теплопередачи в хладагент. Такое снижение с неизбежностью происходит, если изоляция представляет собой сплошное диэлектрическое покрытие [5,6]. При сплошной изоляции время термической стойкости до необратимого разрушения ВТСП-провода в аварийном режиме не превышает одной секунды [7], вследствие чего требуется обязательное отключение тока. В настоящей работе для исключения электрических контактов между слоями ВТСП-провода в защитных резисторах предлагается применить электроизоляцию в виде сетки. Тогда в ячейках сетки будет иметь место доступ хладагента непосредственно к поверхности провода, что обеспечит эффективность охлаждения, а нити сетки будут отделять прилегающие

провода друг от друга. Поскольку ВТСП-резисторы в предлагаемых схемных решениях включаются в цепи низшего напряжения электротехнических устройств [1], наличие двухфазного хладагента (при кипении) в слоях ВТСП-резистора не приведет к электрическому пробое. Ввиду бифилярности конструкции резистора в нем не возникнут существенные механические напряжения магнитного происхождения.

Модели резисторов изготавливались из композиционной 2G ВТСП-ленты компании „СуперОкс“ [8]. Для всех образцов и всех испытаний использовался один и тот же отрезок ВТСП-ленты со следующими параметрами: толщина Ag/Cu-стабилизатора $44 \mu\text{m}$ (Ag — $4 \mu\text{m}$, Cu — $2 \times 20 \mu\text{m}$), длина 71 mm, ширина 12 mm, критический ток $I_c = 370 \text{ A}$. С двух сторон ВТСП-ленты наносилось несколько слоев сетчатой изоляции из стекловолкна с ячейками размером $3 \times 4 \text{ mm}$. Каждый слой изоляции имел четыре ячейки по ширине. Для лучшего проникновения жидкого азота внутрь изоляции боковые нити сетки удалялись. Первый слой сетки размещался по центру ленты. Остальные слои сдвигались по ширине ленты на 0.25 ячейки относительно предыдущего слоя. Лента с изоляцией помещалась между текстолитовыми прокладками (их ширина равна ширине ленты). Текстолитовые прокладки сжимались, прижим фиксировался, при этом средняя толщина одного слоя изоляции составляла 0.1 mm.

Все измерения выполнялись на переменном токе промышленной частоты (50 Hz), что соответствует условиям работы ВТСП-резисторов в устройствах электроэнергетического назначения. На резисторе измерялось напряжение, которое включало в себя напряжение непосредственно на ВТСП-проводе и напряжение на токовых контактах. Это обусловлено тем, что при выполнении защитных функций в устройствах токовые контакты являются неотъемлемой частью ВТСП-резистора. Описанные далее результаты измерений определяются наличием контактного и индуктивного сопротивлений, к которым в резистивном и нормальном состоянии добавляется активное сопротивление ВТСП-провода. В результате одновременных измерений мгновенных значений тока и напряжения были получены амплитудные вольт-амперные характеристики (ВАХ), общий вид которых соответствует описанным в [4]. ВАХ содержит начальный линейный участок, который сменяется участком крутого монотонного роста. Оба эти участка являются стационарными, за исключением случая возникновения неустойчивости в неизолированном ВТСП, что будет обсуждаться далее. При некотором значении тока I_q ВАХ теряют монотонный характер и приобретают нестационарную „обратную“ ветвь. Последующий участок ВАХ связан с характером разогрева провода, и при выводе напряжения имеет место гистерезис. Потеря стационарности ВАХ при токе I_q обусловлена нарушением теплового баланса вследствие резкого роста тепловыделений. Значение тока I_q принято называть током теплового

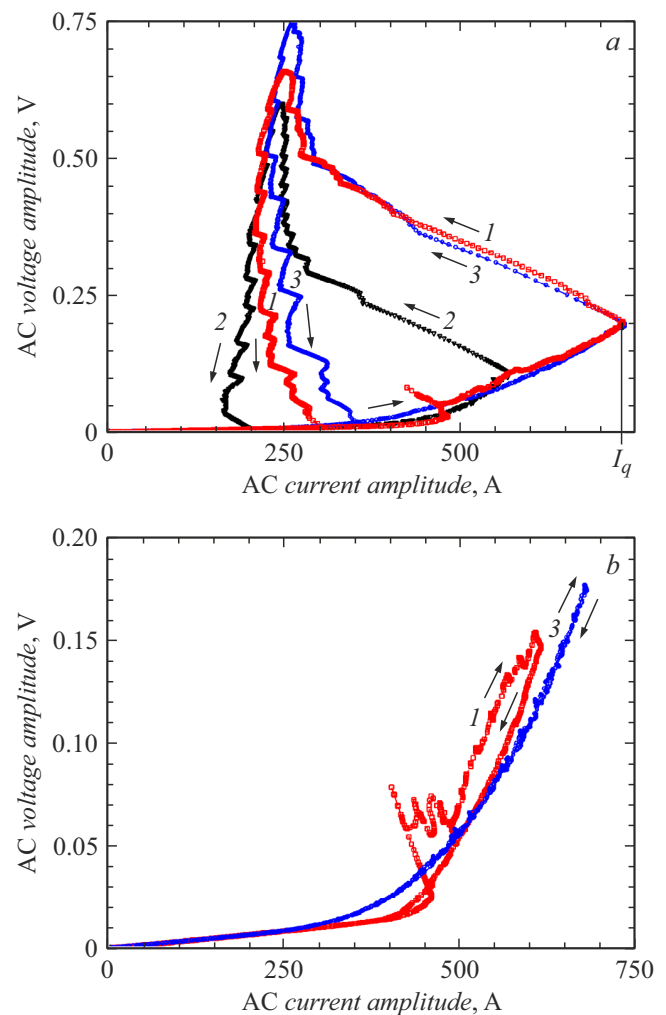


Рис. 1. Амплитудные ВАХ для 2G ВТСП-резисторов. 1 — без изоляции, 2 — один слой изоляции, 3 — пять слоев изоляции.

срыва. Совокупность явлений, связанных с тепловым срывом, исследована в [4,5,9].

В соответствии с целью настоящей работы были выполнены измерения на ВТСП-резисторе без изоляции и с сетчатой изоляцией от одного до шести слоев (с толщиной до 0.6 mm). Результаты этих измерений показали, что при одном слое изоляции ток теплового срыва существенно снизился по сравнению с исходным его значением в неизолированном ВТСП-резисторе. При увеличении числа слоев (двух- и трехслойная изоляция) ток срыва увеличивается по сравнению с таковым при одном слое изоляции. При четырех слоях сетчатой изоляции ток срыва достигает значения, близкого к I_q неизолированного провода. При дальнейшем увеличении числа слоев уровень I_q меняется слабо.

Ток теплового срыва I_q определялся по ВАХ, которые приведены на рис. 1, а. Чтобы не загромождать рис. 1, а, на нем показаны только некоторые из полученных ВАХ, а именно для неизолированного ВТСП (кривая 1), для однослойной изоляции (кривая 2) и для пятислойной

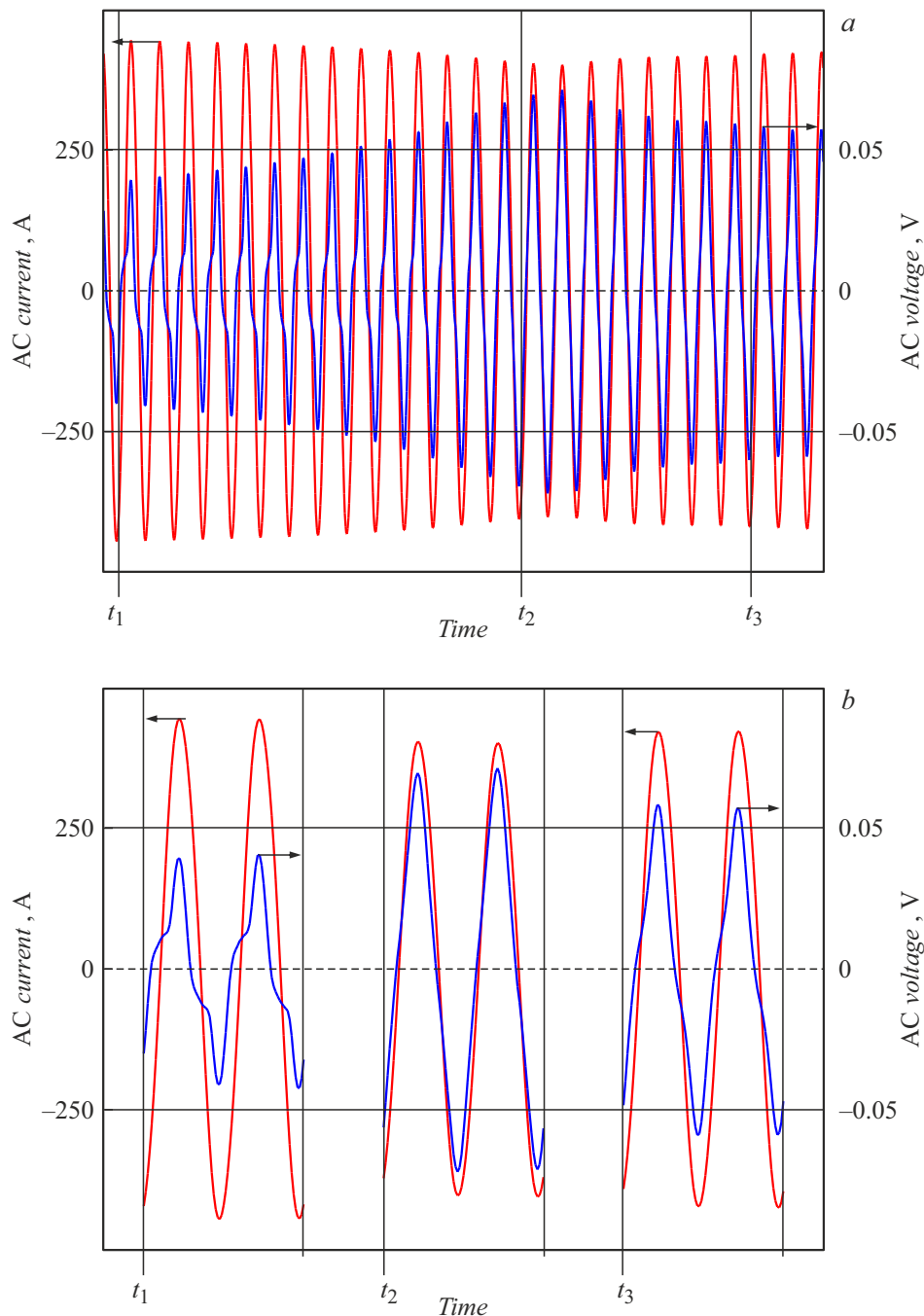


Рис. 2. Осциллограммы напряжения и тока в цепи с неизолированным ВТСП-резистором. *a* — огибающие тока и напряжения в течение большого числа периодов, *b* — отдельные периоды тока и напряжения в различные моменты времени. Частота 50 Hz.

изоляции (кривая 3). Признаком теплового срыва является переход ВАХ с прямой ветви на обратную. На кривых 1 и 3 это происходит при близких значениях тока. Таким образом, установлено, что многослойная сетчатая электрическая изоляция, необходимая для предотвращения замыкания слоев ВТСП-провода, не приводит к снижению тока теплового срыва и может быть применена в конструкции защитных ВТСП-резисторов.

Помимо теплового срыва в неизолированных ВТСП-проводах второго поколения при намного меньших зна-

чениях тока существует еще один вид неустойчивости, обусловленный изменением характера теплопередачи в хладагент (жидкий азот) от конвекции к пузырьковому кипению [5,10]. Эта неустойчивость видна на полномасштабной ВАХ (кривая 1 на рис. 1, *a*) в диапазоне токов 450–500 А, а соответствующая область неустойчивости приведена отдельно на рис. 1, *b* (кривая 1). Как показали выполненные измерения, такая неустойчивость отсутствует при наличии сетчатой изоляции — как однослойной (кривая 2 на рис. 1, *a*), так и многослойной

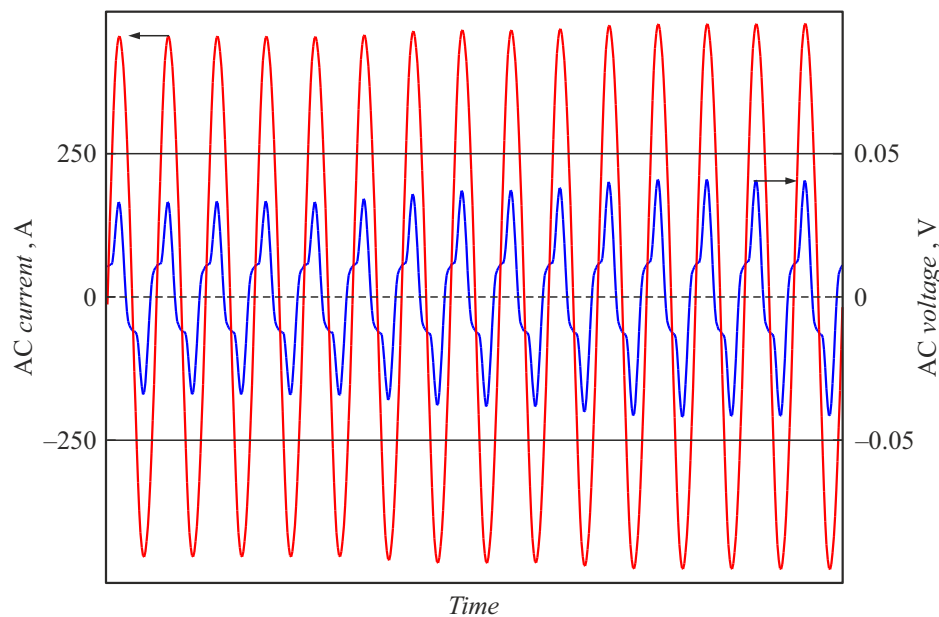


Рис. 3. Оциллограммы напряжения и тока в цепи с ВТСП-резистором при наличии сетчатой электрической изоляции. Частота 50 Hz.

(кривая 3 на рис. 1, *a* и *b*). В этой области ВАХ гистерезисные явления в изолированном ВТСП-проводе также не происходят (кривая 3 на рис. 1, *b*). Тем самым сетчатая электроизоляция обеспечивает стабильность работы защитных ВТСП-резисторов во всем диапазоне резистивного состояния.

Процессы, происходящие в цепи с ВТСП-резистором при развитии неустойчивости, можно проследить с использованием оциллограмм тока и напряжения (рис. 2, *a, b*). На рис. 2, *a* представлены оциллограммы для неизолированного ВТСП-провода, содержащие несколько десятков периодов. На рис. 2, *b* приведены отдельные периоды в моменты времени t_1 , t_2 и t_3 . Видно, что в момент времени t_1 напряжение является несинусоидальным вследствие нелинейности ВАХ провода в резистивном состоянии. В момент времени t_2 форма напряжения синусоидальная, что свидетельствует о линейности ВАХ вследствие перехода ВТСП в нормальное состояние. В этот момент сопротивление ВТСП-резистора достигает максимума, что непосредственно следует из рис. 2, *a*. Наконец, в момент t_3 несинусоидальность напряжения возвращается, а сопротивление резистора становится меньше максимального. Таким образом, неустойчивость в неизолированном проводе приводит к периодическому переходу сверхпроводника из резистивного в нормальное состояние и обратно [10].

При наличии сетчатой изоляции наблюдается совершенно иная картина (рис. 3). Форма сигнала напряжения на всем протяжении оциллограммы является синусоидальной, а его амплитуда монотонно возрастает при увеличении тока. Никакие колебательные процессы на огибающих тока и напряжения не происходят. При вводе и выводе тока оциллограммы воспроизводятся, а

гистерезис ВАХ отсутствует (кривая 3 на рис. 1, *b*). Это означает, что ВТСП-резистор с сетчатой электроизоляцией в рассматриваемом диапазоне токов и напряжений находится в стабильном резистивном состоянии. Оно обусловлено тем, что изоляционная сетка затрудняет конвекцию хладагента, поэтому при превышении критического тока нагрев провода увеличивается (на рис. 1, *b* при токах 300–500 А кривая 3 лежит выше кривой 1), что приводит к развитию пузырькового кипения и росту теплоотдачи. Наличие стабильности и обеспечение перегрузочной способности являются благоприятными факторами для применения 2G ВТСП-резисторов с сетчатой электрической изоляцией в качестве составляющего элемента в ряде электротехнических устройств.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания АААА-А19-119083090048-5.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] В.А. Мальгинов, А.В. Мальгинов, Л.С. Флейшман, ЖТФ, **89** (12), 1853 (2019). DOI: 10.21883/JTF.2019.12.48482.344-18 [V.A. Malginov, A.V. Malginov, L.S. Fleishman, Tech. Phys., **64** (12), 1759 (2019). DOI: 10.1134/S106378421912017X].
- [2] В.Р. Романовский, ЖТФ, **85** (1), 87 (2015). <https://journals.ioffe.ru/articles/41256> [V.R. Romanovskii, Tech. Phys., **60** (1), 86 (2015). DOI: 10.1134/S106378421501020X].

- [3] S. Veselova, M. Osipov, A. Starikovskii, I. Anishenko, S. Pokrovskii, D. Abin, I. Rudnev, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1975**, 012015 (2021). DOI: 10.1088/1742-6596/1975/1/012015
- [4] V.A. Malginov, L.S. Fleishman, D.A. Gorbunova, *Supercond. Sci. Technol.*, **33** (4), 045008 (2020). DOI: 10.1088/1361-6668/ab7470
- [5] V.V. Zubko, S.M. Ryabov, S.S. Fetisov, V.S. Vysotsky, *Phys. Procedia*, **67**, 619 (2015). DOI: 10.1016/j.phpro.2015.06.105
- [6] В.А. Мальгинов, *Крат. сообщ. по физике ФИАН*, **49** (7), 14 (2022). <https://ksflebedev.ru/contents.php?post=1&year=2022&number=07&z=0> [V.A. Malginov, *Bull. Lebedev Phys. Inst.*, **49** (7), 199 (2022). DOI: 10.3103/S1068335622070041].
- [7] M. Yazdani-Asrami, A. Sadeghi, S. Seyyedbarzegar, W. Song, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **33** (1), 5500215 (2023). DOI: 10.1109/TASC.2022.3217967
- [8] S. Samoilenkov, A. Molodyk, S. Lee, V. Petrykin, V. Kalitka, I. Martynova, A. Makarevich, A. Markelov, M. Moyzykh, A. Blednov, *Supercond. Sci. Technol.*, **29** (2), 024001 (2016). DOI: 10.1088/0953-2048/29/2/024001
- [9] S.S. Fetisov, V.S. Vysotsky, V.V. Zubko, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **21** (3), 1323 (2011). DOI: 10.1109/TASC.2010.2093094
- [10] В.А. Мальгинов, А.В. Мальгинов, Л.С. Флейшман, *Письма в ЖТФ*, **45** (7), 25 (2019). DOI: 10.21883/PJTF.2019.07.47532.17657 [V.A. Malginov, A.V. Malginov, L.S. Fleishman, *Tech. Phys. Lett.*, **45** (4), 331 (2019). DOI: 10.1134/S1063785019040096].