



Статья

Режимы управляемой коммутации в переключателе на основе ВТСП композитов

И. В. Мартиросян^{1*}, И. К. Михайлова¹, С. В. Покровский¹, И. А. Руднев¹

¹ Национальный Исследовательский Ядерный Университет «МИФИ», 115409, Москва, Россия

* e-mail: mephizic@gmail.com

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований процессов переключения высокотемпературных сверхпроводящих лент под действием импульсной токовой нагрузки микросекундной длительности. Реализованы обратимое, устойчивое и необратимое переключения сверхпроводника в нормальное состояние. Для демонстрации возможности осуществления контролируемой генерации переходных процессов в сверхпроводящих композитах на основе экспериментальных результатов проведен расчёт характеристик сверхпроводящего коммутатора, способного выполнять переключение между различными типами терминальных возбуждений, в частности возможности одновременной отсечки питания по току и напряжению.

Ключевые слова: динамические состояния; ВТСП переключатель; ВТСП ключ.

1. Введение

Возможность практически бездиссипативной передачи электроэнергии при помощи сверхпроводников позволяет существенно увеличить эффективность энергетических систем [1]. В настоящее время высокотемпературные сверхпроводящие (ВТСП) ленточные проводники (ВТСП ленты) всё чаще находят применения в областях энергетики, энергоэффективных системах передачи, накопления, распространения и распределения энергии [2–5]. Реализация ярко-выраженных термоиндуцированных динамических состояний (ДС), приводящих к переходу сверхпроводника в нормальное состояние, позволяет применять ВТСП ленты в таких устройствах, как ограничители тока [6] и ВТСП переключатели (ключи) [7]. Скорость срабатывания таких ВТСП коммутаторов ограничена скоростью распространения теплового пятна в сверхпроводнике. Однако, данный режим работы не должен оказывать разрушающего воздействия на ВТСП ленту, а ключ и токоограничитель должны обладать способностью многократно выдерживать переход от стационарного процесса к нестационарному и обратно. Основным препятствием для контролируемой генерации ДС и переходных процессов в ВТСП является наличие тепловых нестабильностей и нагрева при амплитуде тока $I \geq I_c$, которые могут привести к быстрому выгоранию ленты. Вопросам исследований процессов формирования и движения нормальной зоны, а также нагрева сверхпроводника при импульсах токах в диапазоне времен возрастания тока от десятков микросекунд до сотен миллисекунд посвящен ряд работ [8–14]. Физика развития тепловых процессов в сверхпроводниках в таких режимах нагрузки хорошо изучена, её описание сводится к моделям течения и крипа магнитного потока [15, 16]. Получаемые характерные скорости распространения нормальной зоны в ВТСП лентах имеют порядка нескольких см/сек, при этом нагрев может достигать сотен кельвинов [10].

В работах [10–14] было показано, что при коротких токовых воздействиях проявляется сильное влияние на результаты измерений режимов кипения жидкого азота, процессов динамического нагрева и формирования горячего пятна, что, в свою очередь, существенно усложняет обработку и интерпретацию экспериментальных данных, а также моделирование подобных систем. Большую роль при этом играют толщины слоёв ВТСП ленты и характеристики электрического и теплового контакта между ними [13]. Предположительно, ряд других факторов, таких как скорость нарастания фронта воздействия и режимы охлаждения, также могут оказывать существенное влияние на процессы переключения ВТСП коммутатора. Однако детальные исследования, посвящённые этому вопросу, в литературных источниках не представлены.

Совокупность описанных выше факторов препятствует прогнозированию характеристик ВТСП ключей на основе первопринципных подходов. Однако с использованием базовых экспериментальных методик, таких как измерение тока и напряжения на ВТСП образце в процессе приложения токовой нагрузки, возможно однозначное установление граничных режимов работы ВТСП ключа заданной архитектуры в заданных режимах охлаждения и нагрузки. Это позволяет осуществлять точный контроль над процессами развития ДС в ленточных ВТСП композитах. Таким образом, целью настоящей работы является демонстрация на основе экспериментальных результатов в сочетании с методами численного моделирования принципов осуществления контролируемой генерации динамических состояний в ВТСП композитах на примере реализации сверхпроводящего коммутатора, способного выполнять переключение между различными типами терминальных возбуждений (по току и по напряжению).

2. Используемые материалы и/или методы

Для проведения транспортных измерений при пропускании через ВТСП образец коротких импульсов электрического тока был использован специально изготовленный автоматизированный экспериментальный стенд с импульсным источником тока. Принцип работы источника основан на быстром переходном процессе при разрядке цепочки конденсаторов большой ёмкости (12 конденсаторов, 4700 мкФ каждый). Генерация одиночного импульса производится в два этапа: зарядка конденсатора и последующая разрядка, которая создаёт прямоугольный импульс с контролируемой длиной от 7 мкс до 500 мкс и временем нарастания фронта воздействия 1–5 мкс. Работой источника управляет программируемая логическая схема на базе микроконтроллера Arduino Due. Максимальная амплитуда тока в импульсе составляет 1,5 кА (при зарядке до напряжения 50 В). Подробное описание экспериментальной установки можно найти в работе [18]. Электрические измерения проводились в жидком азоте по четырехконтактной схеме. Расстояние между потенциальными контактами, на котором проводилось измерение напряжения на образце, составляло 6 мм. Интервал выбран из соображений формирования устойчивого импульса тока при малых временах воздействия и минимизации влияния процессов динамического нагрева, формирования горячего пятна и режимов кипения жидкого азота на результаты измерений.

В качестве образцов для проведения экспериментальных исследований использовались коммерческие ВТСП ленты производства SuperOx ширины 4 мм, содержащие в своём составе слой подложки сплава Hastelloy C276 толщиной 0,1 мм, ВТСП слой $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (далее YBCO) толщиной 1 мкм, а также слои меди (~20 мкм) и серебра (~3 мкм). Критический ток J_c ВТСП лент в собственном поле при температуре кипения жидкого азота составил 120 А. Образцы, охлаждаемые жидким азотом, подвергались воздействию импульсами транспортного тока амплитудой от 0 А до 600 А (5 J_c). Длительность токового воздействия при этом составляла 100 мкс, а время нарастания фронта воздействия — 5 мкс.

Для демонстрации особенностей управления процессами переключения ВТСП композита была разработана модель коммутирующего устройства для управления параметрами питания цепи, в частности возможности одновременной отсечки питания по току и напряжению. Для модельной реализации ВТСП ключа было использовано несколько новых модельных подходов. Во-первых, в виду того, что сопротивление сверхпроводника в области фазового S-N перехода зависит не только от температуры, но и от плотности тока, считаем, что температура начала N-S перехода T_N постоянна, как постоянно и нормальное сопротивление YBCO при этой температуре. Для анализа сопротивлений при температурах $T < T_N$ используется предложенная и верифицированная нами ранее модель динамического сопротивления [18]. Модель использует экспериментальные данные по напряжению и току на образце в качестве входных параметров

и позволяет проследить процессы перераспределения токов между слоями ВТСП композита. Во-вторых, режим работы ВТСП ключа в составе коммутирующего устройства соответствует границе необратимого роста сопротивления (а, значит, и напряжения), то есть ВТСП ключ находится на пороге динамической тепловой нестабильности. Это означает, что ВТСП ключ пропускает такой ток, при превышении величины которого сопротивление ВТСП элемента будет расти даже при протекании постоянного транспортного тока.

Численная модель коммутирующего ВТСП устройства разработана на базе модуля Electric currents (Электрические токи) пакета Comsol Multiphysics с интегрированием в модель интерфейса Events (События) и показывает возможности применения ВТСП коммутатора для управления параметрами питания потребителя. Функция дискретных состояний интерфейса Events определяет переменную с одним состоянием S , которая действует как маркер, указывающий, находится ли источник питания в режиме постоянного тока $S=1$ или в режиме постоянного напряжения $S=0$. Далее имеется функция состояний индикатора, определяющая две переменные U_{\max} (пиковое напряжение) и J_{\max} (пиковый ток), которые должны плавно меняться с течением времени. Наконец, есть две неявные функции событий, которые будут отслеживать эти две переменные состояния индикатора и изменять переменную дискретного состояния S на ноль или единицу. Процессом переключения по напряжению при постоянном токе управляет ВТСП ключ, для которого при возникновении заданного напряжения отсечки начинается переход в резистивное состояние (рост сопротивления). Стоит отметить, что использованная модель динамического сопротивления ВТСП слоя не является самостоятельной — она использует и обрабатывает экспериментальные данные и позволяет выполнять расчёт характеристик, не являющихся из эксперимента напрямую, а именно временные зависимости сопротивлений всех слоёв ленты. Таким образом, модель коммутирующего устройства лишь прогнозирует поведение ВТСП ключа на основе данных экспериментальных исследований для экспериментально установленных переходных значений тока и напряжения на образце.

3. Результаты

На основе результатов проведенной серии экспериментальных исследований была построена зависимость максимального напряжения на ВТСП образце от амплитуды приложенного транспортного тока (рис. 1). Из рисунка видно, что при микросекундных временах воздействия нелинейный участок вольтамперной характеристики отсутствует — при любом ненулевом токе сразу же возникает напряжение на образце. Возникновение напряжения свидетельствует о формировании выраженного динамического состояния, начале развития тепловой неустойчивости системы и переключения сверхпроводника в нормальное состояние. При амплитудах транспортного тока до $\sim 1.8 J_c$ наблюдается низкоомный режим напряжения или, так называемый, режим течения потока. Этот режим, с хорошей точностью аппроксимирующийся линейной зависимостью, соответствует обратимому переключению ВТСП композита в нормальное состояние и характеризуется снижением напряжения на образце при поддержании или росте транспортного тока (рис. 2). Другой линейный режим переключения, определяемый как омический, начинается при амплитудах тока выше $2 J_c$ и отличается непрерывным ростом напряжения вплоть до окончания приложения постоянной токовой нагрузки (рис. 3). В омическом режиме течения магнитного потока наблюдается необратимое переключение сверхпроводника, которое при продолжающейся токовой нагрузке неизбежно приведет к термическому разрушению образца.

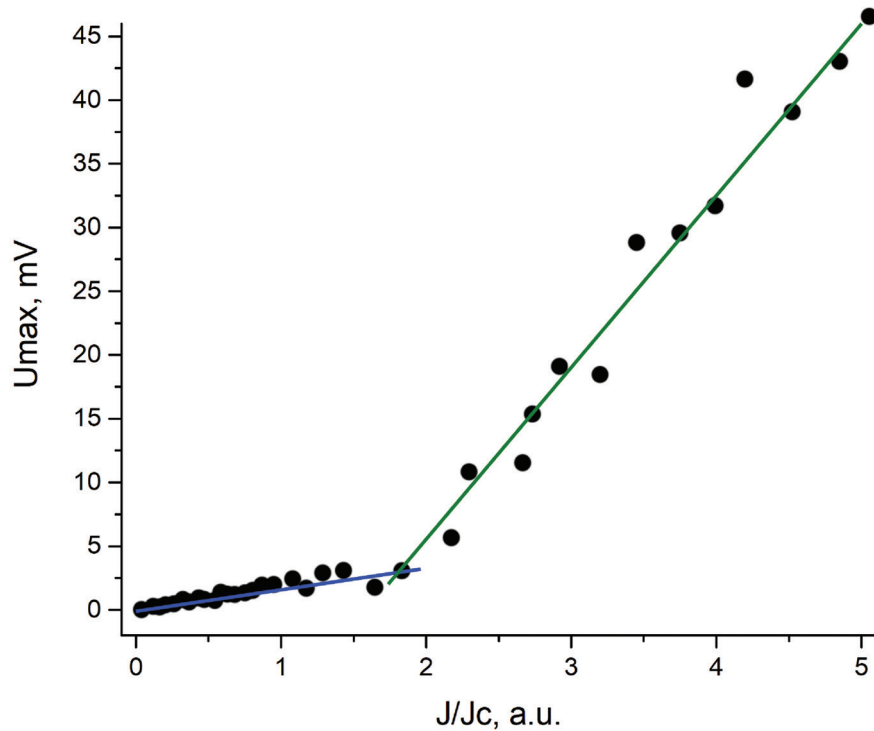


Рис. 1. Зависимость максимального значения напряжения на сверхпроводнике от амплитуды тока. Критический ток образца 120 А, длительность импульса – 100 мкс, время нарастания фронта воздействия – 5 мкс

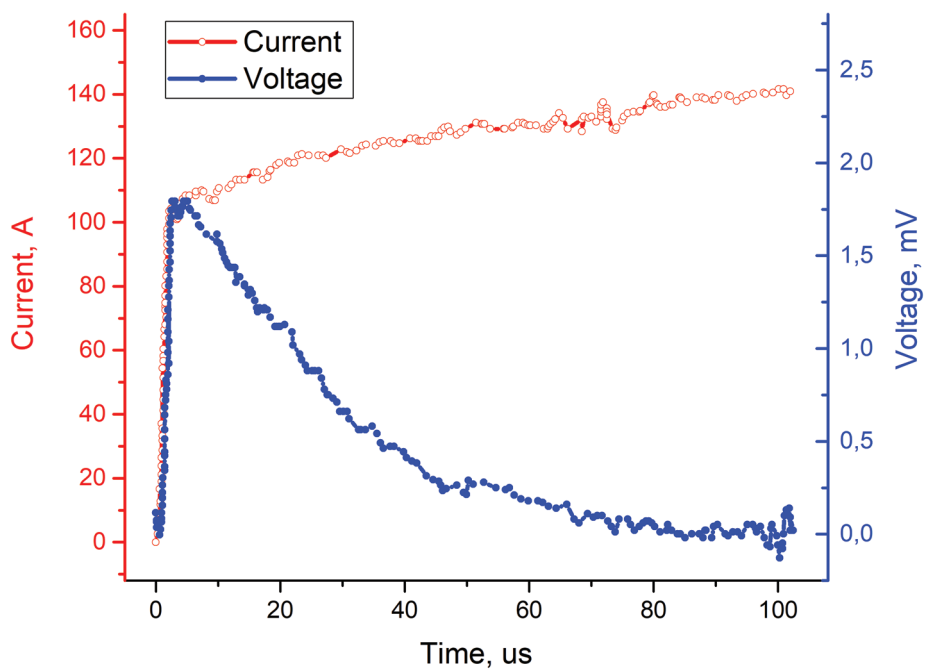


Рис. 2. Временные зависимости тока и напряжения на образце ВТСП ленты при приложении импульса тока амплитуды 140 А (~1,17 J_c). Длительность токовой нагрузки 100 мкс, время нарастания фронта воздействия – 5 мкс. Обратимое переключение

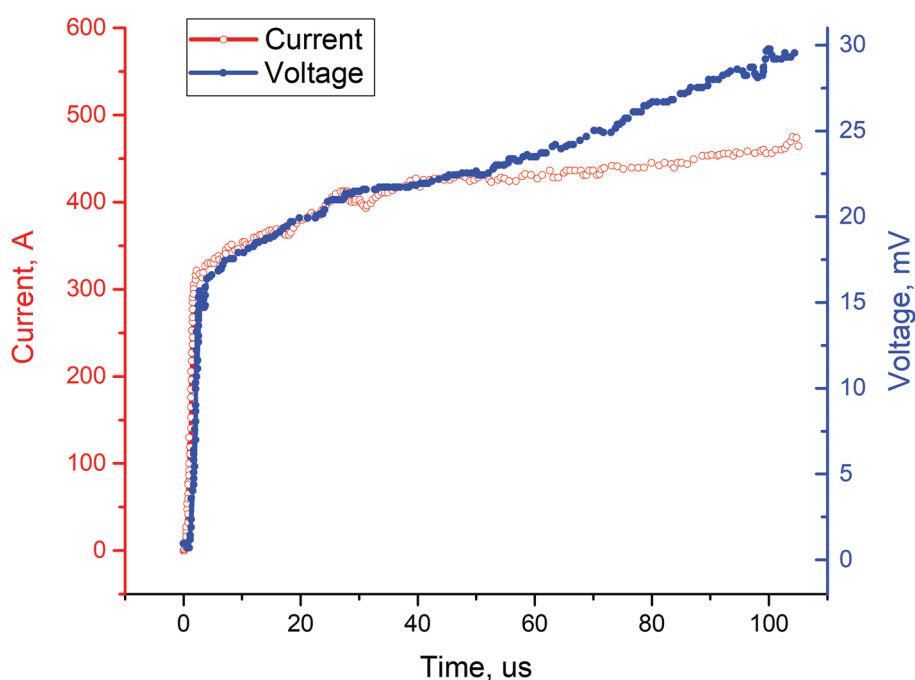


Рис. 3. Временные зависимости тока и напряжения на образце ВТСП ленты при приложении импульса тока амплитуды 450 А ($\sim 3,75$ Дж). Длительность токовой нагрузки 100 мкс, время нарастания фронта воздействия – 5 мкс. Необратимое переключение

Между режимом течения потока и омическим режимом существует достаточно узкая область транспортных токов, в которой наблюдается устойчивый режим переключения (рис. 4). В этом режиме процессы тепловыделения и теплоотвода в системе уравниваются и напряжение на образце поддерживается приблизительно на одном уровне на протяжении всего импульса, несмотря на то, что транспортный ток превышает критический ток композита почти в два раза.

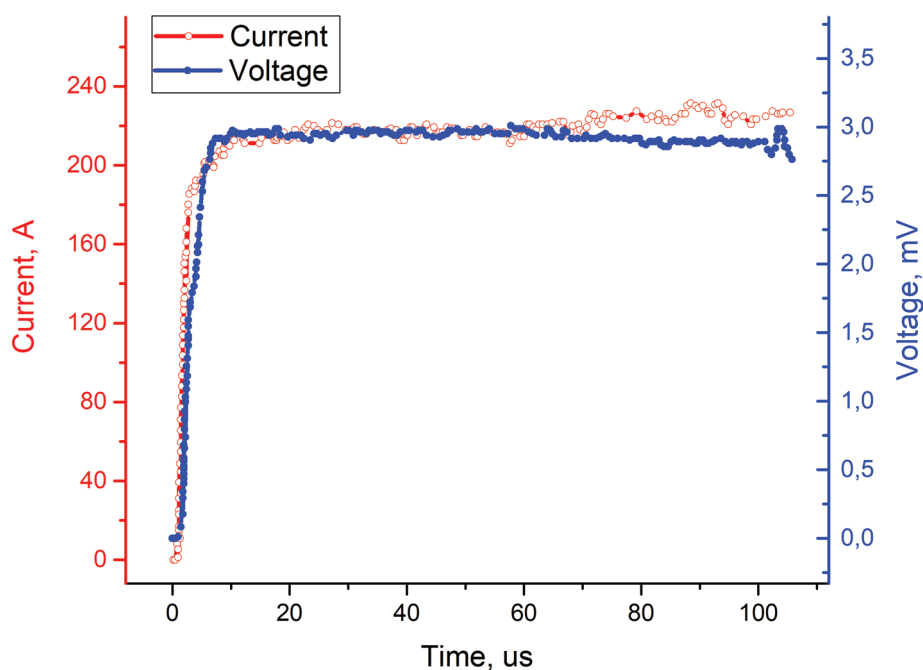


Рис. 4. Временные зависимости тока и напряжения на образце ВТСП ленты при приложении импульса тока амплитуды 231 А ($\sim 1,93$ Дж). Длительность токовой нагрузки 100 мкс, время нарастания фронта воздействия – 5 мкс. Устойчивое переключение

На процессы установления баланса между тепловыми процессами в системе влияют режимы нагрузки и охлаждения, а также архитектура композитных ВТСП лент, например, толщины стабилизирующих слоёв. Однако, возможность экспериментального обнаружения устойчивого переключения сверхпроводника позволяет определить значения пикового тока J_{\max} и пикового напряжения U_{\max} и применить их для разработки коммутирующего ВТСП устройства и реализации циклического переключения (рис. 5). Из рисунка видно, что изначально ток постоянен, но ввиду того, что сверхпроводник находится на пороге динамической тепловой неустойчивости, сопротивление растёт, как растёт и напряжение на образце. Затем источник питания переключается в режим постоянного напряжения и ток изменяется. Когда сопротивление падает, ток поднимается до своего пикового значения, а затем источник питания переключается обратно в режим постоянного тока до тех пор, пока напряжение вновь не вырастет.

Расчёт показывает, что за 100 мкс работы коммутатор выполняет 5 циклов изменений терминального типа возбуждения, инициированных переключением ВТСП ключа. Полученные минимальные времена переключения составили ~ 10 мкс.

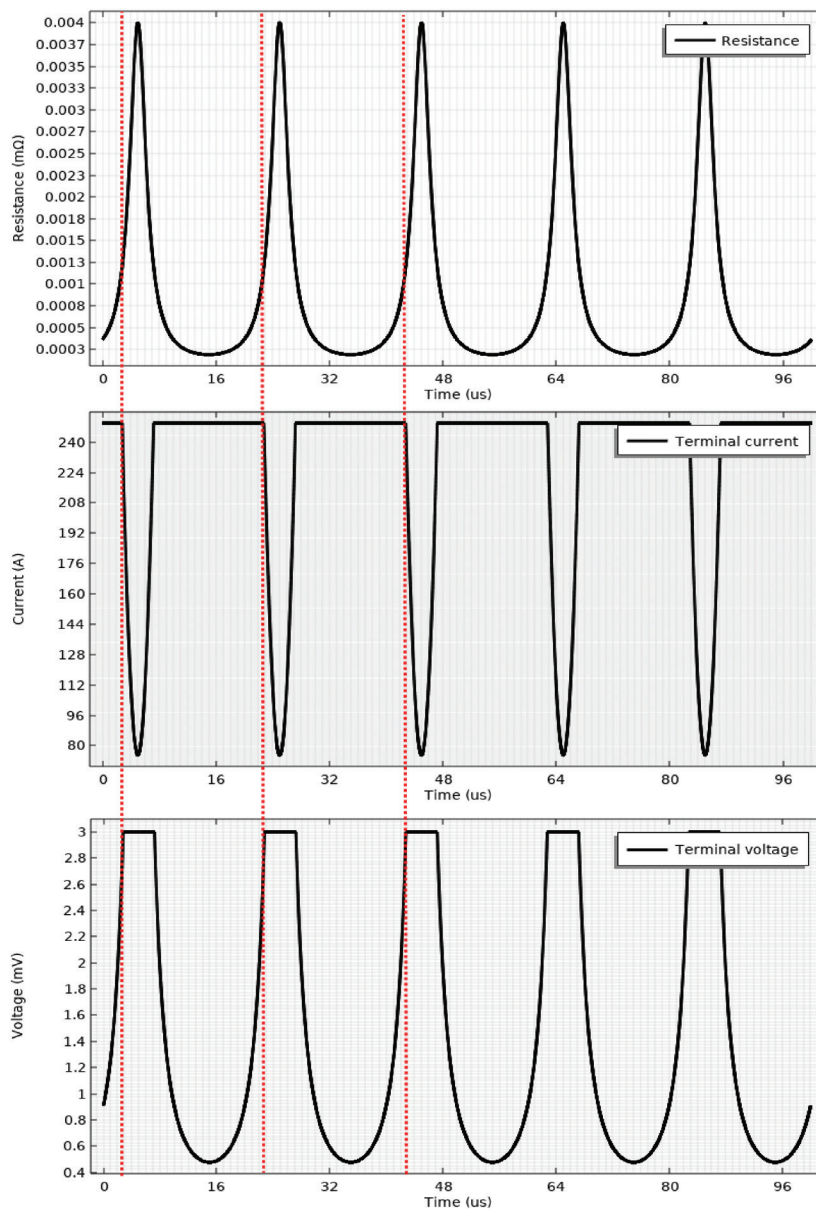


Рис. 5. Зависимости тока, сопротивления и напряжения на образце от времени множественных циклов переключения ВТСП коммутатора

4. Обсуждение

Процессы переключения ВТСП композитов можно разделить на три группы — обратимые, устойчивые и необратимые переключения. Было установлено, что при микросекундных временах импульсного токового воздействия нелинейный участок вольтамперной характеристики отсутствует, при амплитудах транспортного тока до $\sim 1,8 J_c$ наблюдается обратимое переключение сверхпроводника, а при амплитудах тока выше $2 J_c$ — необратимое. Область транспортных токов между этими двумя режимами переключения определяет область устойчивого переключения, которая характеризуется постоянным значением напряжения при поддержании транспортного тока постоянным. Экспериментальные исследования показали, что при протекании транспортного тока величиной 231 А, ВТСП образец с критическим током 120 А находится на пороге необратимого переключения в резистивное состояние, а напряжение, соответствующее этому переходу, составляет ~ 3 мВ. При расчёте параметров ВТСП коммутатора это значение было выбрано в качестве критерия пикового напряжения U_{max} , поскольку при данном напряжении не происходит развития необратимой динамической тепловой нестабильности, но образец находится на её пороге. Моделирование процесса циклического переключения показало, что первоначально источник питания работает в режиме постоянного тока и приложенное напряжение регулируется для поддержания заданного тока — 250 А. Поскольку ВТСП лента при заданном режиме нагрузки находится в подкритическом состоянии, то сопротивление растёт при протекании постоянного тока (в ограниченном интервале времени). Если напряжение превысит критерий в 3 мВ, источник переключится в режим постоянного напряжения и будет поддерживать это значение. При этом, мощности теплоотвода в системе будет достаточно для эффективного теплоотвода, и сопротивление сверхпроводника начнёт снижаться, а ток расти. Если ток вновь превысит величину 250 А, то система вновь переключится в режим постоянного напряжения. Таким образом, мы применяем такое напряжение, чтобы ток в цепи был равен 250 А, а затем такой ток, что напряжение на клемме было равно 3 мВ. Установлено, что за 100 мкс коммутатор выполняет 5 переключений с наименьшими временами перехода ~ 10 мкс.

5. Выводы

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований процессов переключения высокотемпературных сверхпроводящих лент под действием импульсной токовой нагрузки микросекундной длительности. На основе экспериментальных результатов в сочетании с методами численного моделирования продемонстрированы принципы осуществления контролируемой генерации динамических состояний в ВТСП композитах на примере реализации сверхпроводящего коммутатора, способного выполнять переключение между различными типами терминальных возбуждений (по току и по напряжению).

Для проведения анализа режимов переключения ВТСП композита в нормальное состояние при различных амплитудах токовой нагрузки были построены временные зависимости тока и напряжения на образце в процессе приложения импульсной токовой нагрузки. Реализованы обратимое, устойчивое и необратимое переключения сверхпроводника в нормальное состояние. Показано, что с использованием базовых экспериментальных методик, таких как измерение тока и напряжения на ВТСП образце в процессе приложения токового импульса, возможно однозначное установление граничных режимов работы ВТСП ключа заданной архитектуры в заданных режимах охлаждения и нагрузки. Это позволяет осуществлять точный контроль над процессами развития переходных процессов в ленточных ВТСП композитах.

Результаты расчёта работы ВТСП ключа в составе коммутирующего устройства для динамического управления параметрами питания цепи показали стабильное переключение между терминальными типами возбуждений (ток или напряжение) как для единичной нагрузки, так и для множественных циклов нагрузки. Процессом переключения по напряжению при постоянном токе управляет ВТСП ключ, для которого при возникновении заданного напряжения отсечки начинается переход в резистивное состояние (рост сопротивления). При заданных параметрах нагрузки и охлаждения время переключения ВТСП ключа составило несколько микросекунд.

Благодарности

Работа выполнена в рамках Госзадания (проект FSWU-2022-0013) при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ

Литература

- [1]. J. X. Jin, et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **26**, 7, 1 (2016).
- [2]. M. Takayasu, et al., *Supercond. Sci. Technol.*, **25**, 1, 014011 (2012).
- [3]. K. Yagotintsev, et al., *Supercond. Sci. Technol.*, **33**, 8, 085009 (2020).
- [4]. F. N. Werfel, et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **20**, 3, 874 (2010).
- [5]. J. v. Nugteren, et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **26**, 3, 1 (2016).
- [6]. N. Riva, et al., *Supercond. Sci. Technol.*, **33**, 11, 114008 (2020).
- [7]. P. C. Michael, et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **27**, 4, 1 (2017).
- [8]. M. Marchevsky, *Instruments* **5**, 3, 27 (2021).
- [9] J. van Nugteren, et al., *Physics Procedia* **67**, 945 (2015).
- [10] H. Song, et al., *Supercond. Sci. Technol.*, **22**, 6, 062001 (2009)
- [11] F. Sirois, et al., *Supercond. Sci. Technol.*, **23**, 3, 034018 (2010).
- [12] F. Sirois, et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **19**, 3, 3585 (2009).
- [13] P. Bernstein, et al., *J. Appl. Phys.*, **109**, 3, 033915 (2011).
- [14]. N. Riva, et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **29**, 5, 1 (2019).
- [15]. Y. B. Kim, et al., *Phys. Rev. Lett.*, **9**, 7, 306 (1962).
- [16]. P. W. Anderson, et al., **36**, 1, 39 (1964).
- [17]. Д. А. Абин и др., *Кабели и Провода* **3**, 383, 20 (2020).
- [18]. И. В. Анищенко и др., *Письма в ЖТФ* **47**, 19 (2021).

Controlled operation modes in a HTS composite-based current switch

I. V. Martirosyan*, I. K. Mikhailova, S. V. Pokrovsky, I. A. Rudnev

1 National research nuclear university «МЕРНУ», 115409, Moscow, Russia

* e-mail: mephizic@gmail.com



Мартиросян Ирина Валерьевна, кандидат физико-математических наук, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ).

Dr. Irina Martirosian, National research nuclear university «МЕРНУ».



Михайлова Ирина Константиновна, инженер-исследователь, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ).

Irina Mikhailova, Research Engineer, National research nuclear university «МЕРНУ».



Покровский Сергей Владимирович, кандидат физико-математических наук, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ).

Dr. Sergey Pokrovskii, National research nuclear university «МЕРНУ».



Руднев Игорь Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ).

Dr., Prof. Igor Rudnev, National research nuclear university «МЕРНУ».