

05;12

Новая концепция переключателя тока на основе высокотемпературного сверхпроводника

© С.Г. Овчинников,¹ В.И. Кирко,² А.Г. Мамалис,³ М.И. Петров,¹ В.В. Иванов,²
Д.А. Балаев,¹ Д.М. Гохфельд,¹ С.А. Харламова,¹ С.В. Милицын,², К.А. Шайхутдинов¹

¹ Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН,
660036 Красноярск, Россия

² Научно-исследовательский физико-технический институт Красноярского государственного университета,
660036 Красноярск, Россия

³ National Technical University of Athens,
10682, Athens, Greece.

(Национальный технический университет Афин,
10682, Афины, Греция).

(Поступило в Редакцию 6 июля 2000 г.)

Предложена новая концепция устройства защиты сети переменного тока на основе комбинации сверхпроводящего ограничителя тока короткого замыкания (КЗ) и размыкателя электрической сети. В качестве активного элемента сверхпроводящего ограничителя тока использован высокотемпературный сверхпроводник в виде стопки плоских колец. Приведены результаты испытания макета такого ограничителя в стационарном режиме короткого замыкания. Приведены характеристики композитных материалов, не содержащих серебра, используемых для конструирования размыкателя тока.

Введение

Возможность использования сверхпроводников в качестве активных элементов для ограничителей тока короткого замыкания (КЗ) привлекала исследователей достаточно давно [1,2]. Однако высокая стоимость как устройств, так и хладагента (жидкий гелий) для низкотемпературных сверхпроводников препятствовала их широкому применению. Открытие высокотемпературной сверхпроводимости возродило интерес к исследованиям в этой области, поскольку высокая температура перехода в сверхпроводящее состояние (90–120 К) позволяет использовать в качестве хладагента жидкий азот [3–8].

Простейший ограничитель тока основан на переходе сверхпроводника из сверхпроводящего состояния, в котором электросопротивление равно нулю, в нормальное с конечным значением электросопротивления при возрастании тока сверх критического. При аварийной ситуации, сопровождающейся увеличением тока в сети, появление дополнительного балластного сопротивления (равного нулю в обычном режиме) свягает режим КЗ. Преимущество использования сверхпроводящего активного элемента состоит в том, что он (в отличие от механических размыкателей) имеет очень малое время срабатывания [2] и более высокую надежность. Следует отметить, что в публикациях по ограничителям тока исследовалось в основном поведение сверхпроводящего активного элемента в перегрузочном режиме [4–8]. В данной работе мы предлагаем новую концепцию аппарата защиты, в которой основное внимание уделяется комбинированию размыкателя цепи (электрические контакты которого выполнены из композитных материалов, не содержащих серебра [9–13]) с ограничителем тока на основе высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП).

Комбинирование размыкателя и сверхпроводящего ограничителя тока.

Рассмотрим цепь последовательно соединенных нагрузки сверхпроводящего ограничителя тока и размыкателя (переключателя). Без ограничителя тока способность переключателя защищать нагрузку определяется критическим значением мощности W_{SW}^{CO} , которая разрушает переключатель. В присутствии ограничителя тока суммарная мощность при КЗ W_{ex} перераспределяется между ограничителем и переключателем

$$W_{ex} = W_{SCL}^C + W_{SW}^{CO}.$$

Критическая мощность W_{SCL}^C , при которой ограничитель тока разрушается, определяется удельным электросопротивлением сверхпроводника в нормальном состоянии, его механической прочностью и конструктивными особенностями ограничителя. В комбинированной системе размыкателя и ограничителя тока мощность, выделяющаяся в размыкателе, будет меньше, чем без сверхпроводящего ограничителя, и критическое значение мощности для переключателя W_{SW}^C может быть уменьшено

$$W_{SW}^C = W_{SW}^{CO} - W_{SCL}^C.$$

Выражение (1) имеет смысл при $W_{SW}^{CO} > W_{SCL}^C$. Если $W_{SW}^{CO} < W_{SCL}^C$, вся мощность в режиме КЗ выделяется на сверхпроводящем ограничителе тока. Практическое значение выражения (1) заключается в том, что в комбинированной системе ограничитель тока+переключатель возможно уменьшить требования к размыкателю цепи. Поэтому для таких переключателей можно использовать менее дорогостоящие контактные материалы, такие как бессеребряные композиты, состоящие из меди с

малыми добавками ультрадисперсных алмазов [9–13]. Другим преимуществом такой комбинированной системы является повышение надежности срабатывания, так как ВТСП элемент защищает помимо нагрузки и сам размыкатель.

Ограничитель тока на основе ВТСП

В настоящее время существует несколько концепций ограничителей [3]. Наиболее распространенными являются так называемые резистивная и индуктивная концепции [4]. В резистивных ограничителях тока сверхпроводник непосредственно включен в схему с защищаемой нагрузкой [4,7,8]. Ограничители такого типа требуют решения технологической задачи изготовления контактов ВТСП–токопровод. В индуктивных ограничителях тока активный сверхпроводящий элемент, выполненный, как правило, в виде кольца или цилиндра, индуктивно связан с нагрузкой [4–7]. Для реализации таких ограничителей необходимо учитывать 1) большие габариты устройств, в которых сверхпроводник экранирует магнитное поле; 2) возможность разрушения сверхпроводящих элементов при больших плотностях тока под действием пондеромоторных сил. В устройствах обоих типов необходимо эффективно отводить выделяющееся в режиме короткого замыкания тепло от сверхпроводника.

В индуктивных ограничителях тока часто используется ВТСП в виде полого цилиндра, который экранирует поле первичной обмотки [4]. Внутри сверхпроводника помещается железный сердечник. Коэффициент заполнения в устройствах такого типа не превосходит 0.6. Для эффективного теплоотвода необходимо, чтобы толщина стенок цилиндра не превышала ~ 2 mm [4,5]. Под действием пондеромоторных сил цилиндр подвергается значительным нагрузкам, по данным работы [4], осевое сжатие до ~ 1500 N, давление на внешнюю поверхность 0.2 bar, что близко к пределу прочности керамического ВТСП. По этой причине большинство конструкций требуют бандажа, разгружающего активный элемент.

В данной работе мы видоизменили конструкцию индуктивного ограничителя тока, в котором ВТСП в виде стопки тонких колец с относительно большим радиальным размером, которые разделены зазором, равным толщине колец ~ 2 mm. Это позволяет увеличить объем ВТСП и, следовательно, рабочую мощность ограничителя. Расчет показал, что увеличение радиального размера в 5 раз (до 10 mm) позволяет отказаться от бандажа, поскольку осевая нагрузка на сверхпроводящее кольцо распределяется на большую площадь, чем в вышеописанном случае [4], и растягивающее напряжение на единицу длины сверхпроводящей стопки колец также меньше. Коэффициент заполнения в данной конструкции близок к единице, так как магнитопровод и набор колец разделены лишь стенкой пенопластового криостата. Дополнительным преимуществом такой конструкции является то, что можно гибко и в широких пределах варьировать

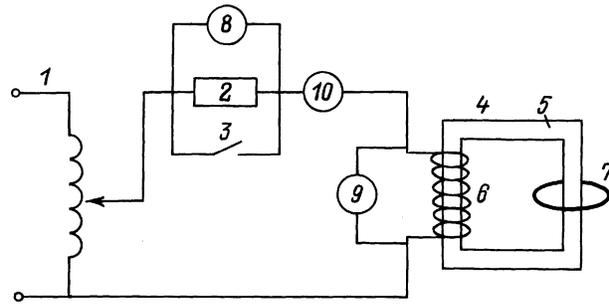


Рис. 1. Электрическая схема испытаний ВТСП колец при моделировании режима КЗ: 1 — внешний сетевой трансформатор (50 Hz); 2 — нагрузка; 3 — ключ, при замыкании которого моделируется режим КЗ; 4 — ограничитель тока, состоящий из магнитопровода 5, выполненного из трансформаторного железа ($\mu = 100$), первичной обмотки 6 (23 витка) и сверхпроводящего кольца 7; 8, 9 — вольтметры, измеряющие падение напряжения на нагрузке и ограничителе соответственно; 10 — амперметр, регистрирующий величину тока в цепи.

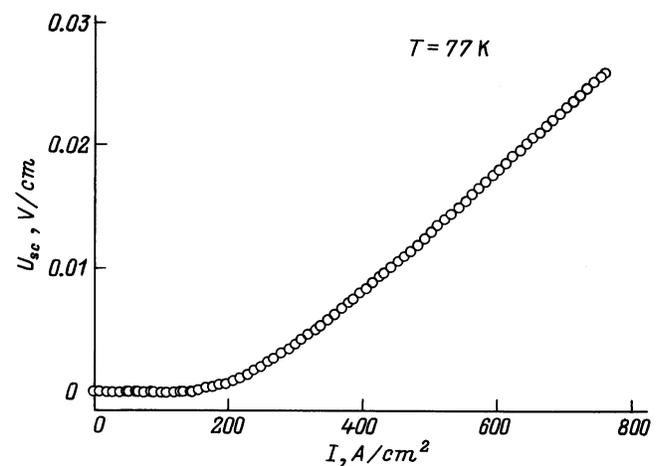


Рис. 2. Типичная стационарная вольт-амперная характеристика ВТСП кольца при 77 К и моделировании режима КЗ.

величину тока срабатывания ограничителя простым изменением числа колец.

Синтез ВТСП $\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.3}\text{Sr}_{1.9}\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ [14] проводился по керамической технологии из Bi_2O_3 , PbO , SrCO_3 , CaCO_3 , CuO при температурах до 840°C и продолжительностью до 250 h с многократными промежуточными помоллами. Малоугловые дебаграммы показали, что доминирующей является фаза Bi-2223. Измерения электросопротивления ρ четырехзондовым методом показали, что начало перехода в сверхпроводящее состояние происходит при

$$T_c = 113 \text{ K}, \quad T_c(\rho < 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}) = 105 \text{ K},$$

$$\rho(T_c) \approx 2 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}.$$

Сверхпроводящие кольца для измерений изготавливались из этого порошка в специально изготовленной

прессформе. Спрессованные кольца проходили окончательный отжиг в безградиентных условиях. Полученные кольца имели внешний диаметр 10 см, внутренний диаметр 8 см, толщину 2–6 мм. Величина плотности критического тока J_c пробных колец, определенная четырехзондовым методом, при 77 К составила 150 А/см² (по критерию 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$).¹

Испытания колец проводились на промышленной частоте 50 Hz по схеме, показанной на рис. 1. Они дали следующие результаты. При значении тока в цепи 1 А падение напряжения на нагрузке составляло $U_r = 19\text{ В}$, падение напряжения на ограничителе $U_{SC} = 0$ ($< 10\ \mu\text{V}$). При КЗ величина тока составляла 9 А, падение напряжения на ограничителе $U_{SC} = 17\text{ В}$ (при этом плотность тока в кольце равна 760 А/см²), падение напряжения на нагрузке $U_r \approx 0$ (падение напряжения на подводящих проводах составило $\approx 2\text{ В}$).

На рис. 2 приведена вольт-амперная характеристика одного из колец, измеренная индуктивным методом по схеме, показанной на рис. 1. Видно, что активный элемент имеет достаточно высокую перегрузочную способность, т.е. может работать в стационарном режиме без разрушения при токах, много больших критических. Мощность, выделяющаяся в кольце, составляет $\sim 150\text{ Вт}$ (20 Вт/см³) и эффективно отводится жидким азотом. Эксперименты с набором колец показали, что ток срабатывания ограничителя аддитивен критическому току отдельных колец.

Следует отметить, что эти экспериментальные результаты получены для стационарного режима. Естественно, что в квазиимпульсном режиме, в котором и будет работать аппарат защиты (время, за которое срабатывает размыкатель), может достигнуть существенно более высоких показателей ограничителя [6,7], по крайней мере мощности $\sim 2\text{ кВт}$ на одно сверхпроводящее кольцо.

Таким образом, предложенная конструкция сверхпроводящего ограничителя тока с использованием активного ВТСП элемента в виде набора плоских колец, на наш взгляд, также перспективна, как и конструкция, в которой активный элемент выполняется в виде тонкостенного ВТСП цилиндра [4,5].

Разрывные контакты на медной основе

Ограничитель тока используется в качестве аппарата защиты, его главные контакты работают в продолжительном режиме включения и, следовательно, основное требование — низкая величина и длительная стабильность переходного сопротивления (R_J) в симметричной контактной паре.

Главным препятствием использования меди как основы для разрывных электроконтактов, используемых в воздушной среде, является ее довольно высокое сродство к кислороду. Попытки снизить окисление медной

¹ В настоящее время ведутся работы по оптимизации окончательного обжига колец для увеличения плотности критического тока.

Таблица 1. Результаты стендовых испытаний материалов на постоянном и переменном токе

Материал	Коммутационный износ, $g/\text{цикл} \cdot 10^6$		$R_J, m\Omega$	
	Анод(+)	Катод(-)	ток	
Cu–Cd–Cdia	-1.2	-4.4	11.9	24.0
Cu–Cd–Nb–Cdia	-0.5	-1.6	8.8	15.7
Cu–Cd–C	-2.5	-3.6	23.3	2.3
Ag-15CdO	-0.6	-0.7	1.2	1.2

матрицы и, таким образом, величину R_J , осуществляются путем легирования материала различными добавками, а также введением восстановителя (чаще всего графита).

Контакты системы медь-графит имеют общий недостаток — низкие значения твердости и прочности, в силу чего они обычно не могут использоваться в аппаратах с многоцикловыми ударными нажатиями.

Предложено вводить углерод в виде относительно дешевого алмазного порошка взрывного синтеза с размерами основной фракции $< 1\ \mu\text{м}$ [9,10]. При этом химическая природа добавки сохраняется, но механические характеристики композита коренным образом улучшаются. При введении в матрицу контакта твердых, тугоплавких частиц алмаза возрастает стойкость к привариванию, материал дополнительно упрочняется. Добавка алмаза способствует также росту эрозионной стойкости контактов, охлаждая основание дуги (вследствие высокой теплопроводности алмаза), способствуя тем самым ее гашению. Дополнительно в композит введены тугоплавкие металлы, также способствующие понижению величины и стабильности R_J , повышению механической и электрической износостойкости (табл. 1, 2).

Вплоть до токов 1000 А величины ΔT находятся в нормируемых пределах. Аналогичные данные получены на контакторах переменного тока ($I = 20, 40, 100\text{ А}$): абсолютные значения T контактных пар лежали в пределах 315...342 К.

Технологическое поведение порошковых композиций [11,12], их окисление в воздухе при температурах, близких к рабочей температуре контактов (330...390 К) [13], и испытания в составе промышленных аппаратов показали, что контактные элементы из рассматриваемых порошковых композитов на основе меди обладают необходимым комплексом основных эксплуатационных свойств и способны обеспечить надежную работу коммутационных аппаратов.

Величина критической мощности электрического контакта W_{SW}^{CO} трудно поддается как экспериментальной проверке, так и теоретической оценке. Как правило, возможно указать только примерное значение W_{SW}^{CO} . Для пары описанных в данной работе контактов критической можно считать мощность порядка $\sim 30\text{--}50\text{ кВт}$. Ограничитель тока с набором 10 ВТСП колец позволяет уменьшить значение критической мощности переключателя на величину $W_{SCL}^C \sim 20\text{ кВт}$, что сравнимо со

Таблица 2. Характерные результаты по превышению температуры частей аппаратов постоянного тока

Номинальные параметры аппарата	$\Delta T, K$			
	Верхние выводы	Нижние выводы	Подвижные контакты	Неподвижные контакты
250 А, 110 В	32.6... 36.5	25.6... 26.0	41.2... 43.7	40.6... 45.1
870 А, 770 В	46.2... 49.7	35.3... 40	63.7... 66.1	72.1... 74.7
600 А, 1500 В	55.7... 57.7	41.8... 42.6	66.9... 69.6	62.6... 63.4
600 А, 1500 В	—	—	69.7... 71.5	73.8... 74.9

значением W_{SW}^{CO} . По нашим оценкам, комбинированный аппарат ограничитель тока+переключатель будет способен работать при токах 100–1000 А для защиты уникального оборудования на крупных предприятиях и транспорте и в опасных технологических процессах.

Дальнейшая работа по созданию прототипа аппарата защиты электрических сетей КЗ на основе сверхпроводящего ограничителя тока и размыкателя на бессеребряных электрических контактах включает: 1) улучшение критических параметров ВТСП колец, 2) конструирование элемента срабатывания на основе бессеребряных контактов, 3) исследование поведения ограничителя в импульсном режиме.

Работа выполняется в рамках совместного российско-греческого проекта "Новая концепция переключателя, основанного на сверхпроводящем ограничителе тока и бессеребряных электрических контактах" (1998–2000 г.) и поддержана целевой программой Красноярской краевой администрации "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники Красноярского края" (проект № 18).

Список литературы

- [1] *McFee R.* // Сверхпроводимость и ее применение в электротехнике / Под ред. Б.К. Буль, Б.М. Тареева, М.; Л.: Энергия, 1964. С. 38–59.
- [2] *Глазков И.Н.* // Исследование сверхпроводящих электротехнических устройств. Новосибирск: ИТФ СО АН, 1980. С. 22–29.
- [3] *E.M.W. Leug* // *Advances in Cryogenic Engineering*. 1996. N 42. P. 961–965.
- [4] *Paul W., Lanker M., Rhyner J.* et al. // *Supercond. Sci. Techn.* 1997. Vol. 10. P. 914–918.
- [5] *Chen. M., Baumann Th., Unternahaher P., Paul W.* // *Physica C*. 1997. Vol. 235–240. P. 2639–2640.
- [6] *Porcar L., Bourgault D., Noudem J.G.* et al. // *Physica C*. 1997. Vol. 235–240. P. 2623–2624.
- [7] *Noudem J.C., Porcar L., Belmont O.* et al. // *Physica C*. 1997. Vol. 235–240. P. 2625–2626.
- [8] *Петров М.И., Балаев Д.А., Кирко В.И., Овчинников С.Г.* // *ЖТФ*. 1998. Т. 68. Вып. 10. С. 129–130.
- [9] *Иванов В.В., Кирко В.И., Иванов Вл.Вл.* Спеченный электроконтактный материал на основе меди. А.С. № 2073736. С 22 С 9/00. 1997.
- [10] *Ivanov V.V., Kirko V.I., Yang Dezhuang, Shao Vanzhu.* // *Abstracts V Russuan-Chinese International Symposium "Advanced Materials & Process"*. 1999. P. 144.
- [11] *Иванов В.В.* // *Перспективные материалы*. 1999. № 3. С. 64–70.
- [12] *Иванов В.В., Денисов В.М.* // *Расплавы*. 1998. № 6. С. 43–47.
- [13] *Ivanov V.V., Shao Vanzhu.* // *Proc. of the congress PM-98*. Vol. 3. P. 545–550.
- [14] *Кравченко В.С., Журавлева М.А., Усков Е.М.* и др. // *Неорганические материалы*. 1998. Т. 34. № 10. С. 1274–1280.