

Сверхпроводниковый ограничитель переменного и постоянного тока

АЛФЕРОВ Д.Ф., АХМЕТГАРЕЕВ М.Р., БУДОВСКИЙ А.И., БУНИН Р.А., ВОЛОШИН И.Ф.,
ЕВСИН Д.В., ИВАНОВ В.П., СИДОРОВ В.А., ФИШЕР Л.М., ЦХАЙ Е.В.

Приводятся результаты экспериментальных исследований коммутационного сверхпроводникового ограничителя тока короткого замыкания (СОТ) в сетях переменного и постоянного напряжения, основанного на высокотемпературных сверхпроводниках (ВТСП) 2-го поколения. Коммутационный СОТ содержит последовательно соединенные ВТСП модуль и быстродействующий выключатель тока с временем отключения 9 мс. Исследования проводились как на образцах с короткими лентами ВТСП длиной до 0,5 м, так и на макетных образцах ВТСП модуля с суммарной длиной ленты до 40 м. При напряжении до 4 кВ максимальная температура нагрева ВТСП не превышала 250 К. Исполнение СОТ и выбранная конструкция ВТСП модуля обеспечивали время восстановления сверхпроводящего состояния ВТСП после отключения тока не более 1,2 с.

Ключевые слова: короткое замыкание, ток, быстродействующий выключатель, сверхпроводники

Одним из перспективных способов решения задачи ограничения токов короткого замыкания (КЗ) является создание токоограничителей, основанных на высокотемпературных сверхпроводниках (ВТСП) 2-го поколения. Такой материал по сравнению со сверхпроводниками предыдущего поколения характеризуется уменьшенным содержанием металла (малая толщина подложки и стабилизатора), дополнительным отводом тепла, более высоким значением критического тока и высокой стойкостью к аварийным токам в нормальном состоянии.

Сверхпроводниковый ограничитель тока (СОТ) отличается от существующих токоограничителей малым уровнем энергетических потерь, способностью практически мгновенно реагировать на превышение тока (в том числе и тока КЗ) и быстро ограничивать его. В нормальных режимах устройство практически не оказывает влияния на режим работы системы, а в аварийных – вводит в сеть сопротивление, необходимое для ограничения тока КЗ до требуемого уровня.

Среди различных типов СОТ резистивный токоограничитель на основе лент ВТСП 2-го поколения представляется наиболее перспективным с

The results from experimental studies of a switched superconducting limiter of short-circuit currents in AC and DC voltage networks are presented. The considered device is constructed on the basis of 2nd-generation high-temperature superconductors (HTSCs). The switched current limiter contains an HTSC module connected in series with a high-speed current interrupter with the interruption time equal to 9 ms. The studies were carried out on samples with short HTSC ribbons up to 0.5 m long and on mockup samples of an HTSC module with the total ribbon length up to 40 m. At a voltage of up to 4 kV, the maximal heating temperature of the HTSC conductor did not exceed 250 K. With the used design solutions for the current limiter and the HTSC module, the HTSC conductor restored its superconducting state after interrupting the current within no more than 1.2 s.

Key words: short-circuit fault, current, high-speed circuit breaker, superconductors

точки зрения компактности и цены [1]. Резистивный СОТ содержит ВТСП модуль, размещенный в криостате с жидким или переохлажденным азотом (хладагентом), и высоковольтные токовые вводы специальной конструкции. Этот модуль состоит из нескольких параллельно соединенных лент. Число параллельных лент m определяется номинальным током сети $I_H: m \approx 2I_H / I_c$, где I_c – критический ток, при превышении которого ВТСП переходит в нормальное состояние.

Экономическая целесообразность создания резистивных ограничителей в значительной степени определяется стоимостью криогенного оборудования и ленты ВТСП. Стоимость последней пропорциональна объему сверхпроводника $V = L_{сп} mab$, где $L_{сп}$ – длина одной ленты ВТСП; a, b – размеры сечения ленты. Минимальная длина ленты ВТСП при условии адиабатического нагрева

$$L_{сп \min} \approx U_{\max} (Dt / ab)^{1/2} / T_{\text{доп}} \quad (1)$$

определяется напряжением сети U_{\max} , длительностью воздействия тока ограничения Dt и допустимым нагревом проводника до температуры $T_{\text{доп}}$ за

время Dt . Допустимая температура $T_{\text{доп}}$ ограничена требованием обеспечения живучести ленты и быстрого восстановления ее сверхпроводящих свойств после завершения процесса ограничения тока. Длительность режима токоограничения Dt определяется полным временем отключения сетевого выключателя и временем формирования сигнала релейной защиты и может составлять 100–150 мс.

При существующих ценах на ВТСП ленты и криокулеры создание резистивных СОТ с длительностью режима токоограничения Dt порядка 0,1 с (время отключения сетевого выключателя) может оказаться экономически нецелесообразным. Существенно уменьшить объем ВТСП и тем самым сделать СОТ конкурентоспособным позволяет концепция построения коммутационного СОТ. Коммутационный СОТ содержит последовательно соединенные ВТСП модуль и быстродействующий выключатель (БВ) с временем отключения Dt в несколько раз меньше времени отключения сетевого выключателя [2–5]. Параллельно ВТСП модулю и выключателю может подсоединяться шунтирующее сопротивление. Такая схема СОТ позволит ограничивать амплитуду тока КЗ до приемлемого уровня при сравнительно небольшом объеме ленты ВТСП. В [6] предложена и испытана оригинальная схема коммутационного СОТ, способного ограничивать и отключать ток КЗ в сетях как переменного, так и постоянного напряжения.

В настоящее время во многих странах проводятся работы по созданию резистивных СОТ для сетей среднего и высокого класса напряжений [7, 8]. Из сравнения известных конструкций (соленоид [9], плоская дисковая катушка [10] и плоская решетка в виде меандра [11]) следует, что наибольшей скоростью восстановления сверхпроводимости обладают конструкции, в которых катушка ВТСП элемента выполнена в виде меандра. В этом случае практически вся поверхность сверхпроводящей ленты контактирует с хладагентом в отличие от катушки в виде соленоида и дисковой катушки. Поэтому применение плоскорешетчатой конструкции ВТСП модуля предпочтительнее для сетей, где требуется быстрое восстановление сверхпроводимости ВТСП модуля.

Для проектирования коммутационного СОТ необходимо знать зависимости нагрева и охлаждения ленты от напряжения сети и глубины ограничения тока в течение одного полупериода тока. Учитывая, что предельные характеристики ВТСП ленты определяются напряжением на единицу длины ленты (электрическим полем) [4, 12, 13], исследования нагрева ленты удобнее проводить при сравнительно малых напряжениях на моделях, состоящих из коротких отрезков ВТСП ленты.

Напротив, время восстановления сверхпроводимости ленты ВТСП после отключения тока КЗ определяется конструктивными особенностями сверхпроводникового модуля. Длина ленты в одном ВТСП модуле может составлять до десятков метров. При этом падение напряжения на ВТСП модуле при его переходе в нормальное состояние может достигать нескольких киловольт при токе ограничения до 1000 А.

В статье приведены результаты экспериментальных исследований нагрева ВТСП ленты в режиме ограничения тока до 1000 А в течение первой полуволны переменного тока. Исследования проводились как на коротких лентах длиной до 0,5 м, так и на образцах ВТСП модуля в виде плоскорешетчатой конструкции с длиной одной ленты до 20 м. Для ограничения тока КЗ в сетях постоянного напряжения предложена схема сверхпроводникового токоограничивающего выключателя (СТВ) постоянного тока. Исследована токоограничивающая способность СТВ. Изучено влияние конструктивного исполнения ВТСП модуля на время восстановления сверхпроводящего состояния после отключения тока КЗ. Проведено сравнение результатов эксперимента с расчетами нагрева ВТСП в течение полуволны тока.

Расчет нагрева ВТСП ленты. При выборе длины ленты в ВТСП модуле на заданное напряжение U_{max} определяющими параметрами являются допустимая температура нагрева $T_{\text{доп}}$ одной ленты, теплофизические характеристики материала ленты и уровень ограничения тока КЗ.

Рассмотрим адиабатный нагрев ВТСП ленты в резистивном режиме при пропускании через нее одной полуволны ($Dt = \rho / \omega$) переменного тока i частотой ω . Предположим, что приращение энергии, выделенной в ленте длиной $L_{\text{СП}}$ за время dt при приложении к концам ленты полуволны синусоидального напряжения $U = U_{\text{max}} \sin(\omega t)$, расходуется только на повышение энергии (а следовательно, и температуры dT):

$$(U_{\text{max}}^2 / R_{\text{СП}}) \sin^2(\omega t) dt = SL_{\text{СП}} g C(T) dT. \quad (2)$$

Здесь $S = ab$ – поперечное сечение ленты; g – плотность материала ленты; $C(T) = C_0 + bT$ – зависимость удельной теплоемкости материала подложки ленты от абсолютной температуры T .

Сопротивление ВТСП ленты зависит от тока i и от температуры T :

$$\begin{aligned} R_{\text{СП}}(T) &\gg 0 \text{ при } i \notin I_c; \\ R_{\text{СП}}(T) &= r_{\text{СП}}(T)L_{\text{СП}} \text{ при } i > I_c, \end{aligned} \quad (3)$$

где $r_{\text{СП}}$ – сопротивление ленты ВТСП.

Зависимость $r_{\text{СП}}(T)$ для ВТСП ленты 2-го поколения в диапазоне температур от 90 до 350 К удовлетворительно аппроксимируется линейной зависимостью $r_{\text{СП}}(T) \approx r_0 + aT$. Для дальнейших оценок считаем $C(T) \approx C(V) \approx 429$ Дж/кг и $r_{\text{СП}}(T) \approx a(\text{Ом}\cdot\text{м}/\text{К})T$. Разделяя переменные t и T , получим дифференциальное уравнение в виде

$$ATdT = u_{\text{max}}^2 \sin^2(\omega t) dt, \quad (4)$$

где $A = SgaC_V$, $u_{\text{max}} = U_{\text{max}} / L_{\text{СП}}$.

Проинтегрировав левую часть уравнения (4) от T_0 до T_{max} , а правую часть от $t=0$ до $t = \rho / \omega$, получим

$$T_{\text{max}} \approx \sqrt{\frac{np}{Aw} \frac{U_0}{L_{\text{СП}}} \frac{\omega^2}{\rho} + T_0^2}. \quad (5)$$

Выражение (5) позволяет оценить минимальную длину ленты данного типа (или максимальное электрическое поле) при заданной максимальной температуре $T_{\text{доп}}$ в конце режима токоограничения, при которой ВТСП элемент сохраняет свою работоспособность. Полагая $T_{\text{max}} \approx T_{\text{доп}} \approx 290$ К, получим выражение для оценки $L_{\text{СП min}}$ одной ленты ВТСП при длительности режима токоограничения $Dt = np / \omega$, n – число полупериодов тока:

$$L_{\text{СП min}}^3 U_{\text{max}} \sqrt{\frac{Dt}{A(T_{\text{доп}}^2 - T_0^2)}}. \quad (6)$$

Выражение (6) можно использовать и для оценки $L_{\text{СП min}}$ в сетях постоянного напряжения U_0 , считая $U_{\text{max}} = U_0$. Согласно (6) с увеличением длительности режима токоограничения пропорционально $(Dt)^{1/2}$ увеличивается $L_{\text{СП min}}$.

При проектировании СОТ необходимо также учитывать переходные процессы, обусловленные динамической вольт-амперной характеристикой ВТСП элемента, особенно в течение первой полуволны тока.

Исследование характеристик коммутационного СОТ в сети переменного напряжения. Испытание коротких образцов ВТСП ленты. А. Условия и методика измерений. Для изучения характеристик коротких образцов ВТСП ленты использовалась лента типа SF12050 производства компании SuperPower шириной 12 мм и толщиной 50 мкм. Критический ток ленты $I_c \approx 270$ А. Длина образцов ленты $L_{\text{СП}} = 10, 25$ и 50 см. Сверхпроводящее покрытие этих лент толщиной около 1 мкм было защищено сверху слоем серебра толщиной около 2 мкм без стабилизирующей медной оболочки. Такие ленты без медной оболочки лучше дру-

гих подходят для использования в резистивных СОТ, так как они обладают наиболее высоким сопротивлением в нормальном несверхпроводящем состоянии.

Исследования проводились на низковольтном экспериментальном стенде, который содержит трансформатор с выходным напряжением $U_0 = 20$ В (действующее значение), вспомогательный вакуумный ключ K_1 с приводом Y_1 , сопротивление нагрузки $R_0 = 0,2$ Ом и систему управления (рис. 1). Параллельно сопротивлению R_0 подсоединена цепочка с соединенными последовательно тиристорным ключом VT и дополнительным сопротивлением R_1 . Ключ VT служит для имитации возникновения тока КЗ, амплитуда которого регулируется изменением сопротивления R_1 . Испытуемые образцы СОТ содержали ленту ВТСП $R_{\text{ВТСП}}$ и вакуумный выключатель K_2 . Они подсоединялись к выходу трансформатора перед нагрузочным сопротивлением R_0 . Во время экспериментов лента ВТСП погружалась в сосуд Дьюара, заполненный жидким азотом.

Система управления (СУ) выдавала сигналы с регулируемой задержкой на включение K_1 в момент максимума сетевого напряжения, включение VT для генерации тока КЗ примерно через один период после начала протекания тока нагрузки и отключение K_2 в конце первой полуволны тока. Ожидаемая амплитуда первой полуволны тока КЗ составляла 4700 А.

Для исследования режима восстановления сверхпроводимости ленты ВТСП после отключения тока выключателем K_2 последний шунтировался сопротивлением $R_2 \approx 50$ Ом. Полная длительность протекания тока в ленте ВТСП составляла около 300 мс.

Собственное сопротивление низковольтной сети в режиме КЗ всегда было мало (менее 15 мОм) по сравнению с сопротивлением ленты ВТСП после ее перехода в нормальное состояние. Поэтому при $R_1 \approx 0$ практически все напряжение сети прикладывалось к ВТСП ленте. Такие условия близки к реальным условиям токоограничения в сетях пе-

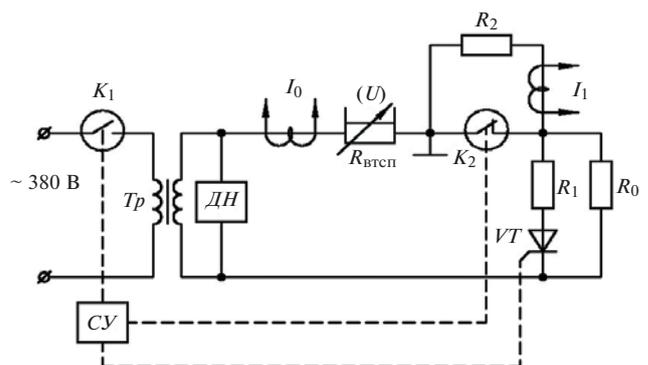


Рис. 1. Схема экспериментального частотного стенда

ременного тока с заданным напряжением. Изменение глубины токоограничения в этом случае легко регулировалось изменением длины ленты ВТСП. Зависимость тока ограничения от напряжения на ленте ВТСП изучалась при изменении значения сопротивления: $R_1 = 0,025; 0,05$ и $0,1$ Ом.

Для каждого образца проводилось осциллографирование тока и напряжения на ленте ВТСП. Ограниченный ток i_{lim} измерялся гальванически развязанным датчиком с чувствительностью 2560 А/В. Для измерения тока i_1 в цепи с сопротивлением R_2 использовался коаксиальный шунт с оптической развязкой и чувствительностью $0,08$ А/В. Измерение напряжения проводилось по двум каналам с разной чувствительностью для режима КЗ и режима охлаждения. Электрические сигналы регистрировались с помощью пробников Р6139А на осциллографе Tektronix DPO 4034 с последующим сохранением и обработкой на персональном компьютере. При обработке на компьютере индуктивная составляющая падения напряжения на ВТСП ленте вычиталась из данных измерений.

Б. Результаты исследований. После включения контактора K_1 в цепи начинал протекать ток нагрузки (первые полтора периода), амплитуда которого 155 А была примерно в 2 раза меньше критического тока I_c . Для демонстрации эффекта ограничения тока КЗ было проведено осциллографирование тока при имитации возникновения тока КЗ без ленты ВТСП. В этом случае в цепи протекал ток $i_{кз}$ с аperiodической составляющей, амплитуда которого составляла 4700 А. При наличии ВТСП ток в цепи ограничивался вследствие нелинейного увеличения сопротивления сверхпроводника после его перехода в нормальное (несверхпроводящее) состояние. Ток ограничения I_{max} определялся степенью нагрева ВТСП в течение полуволны тока.

На рис. 2 показан режим токоограничения на ленте длиной $L_{СП} = 25$ см при $R_1 = 0$ (рис. 2 получен путем наложения осциллограмм тока ограничения i_{lim} и напряжения на ВТСП и осциллограммы тока КЗ I_0 при отсутствии ВТСП). В этом случае глубина токоограничения составила $i_{кз} / i_{lim} \gg 7$.

Осциллограммы тока и напряжения (на единицу длины) на лентах разной длины, полученные при $R_1 = 0$, показаны на рис. 3.

При увеличении длины ленты пропорционально уменьшалось напряжение на ленте и увеличивалась задержка момента возникновения напряжения на ВТСП. Характерной особенностью изменения тока и напряжения во времени является наличие момента, при котором происходило заметное уменьшение скорости нарастания тока и напряже-

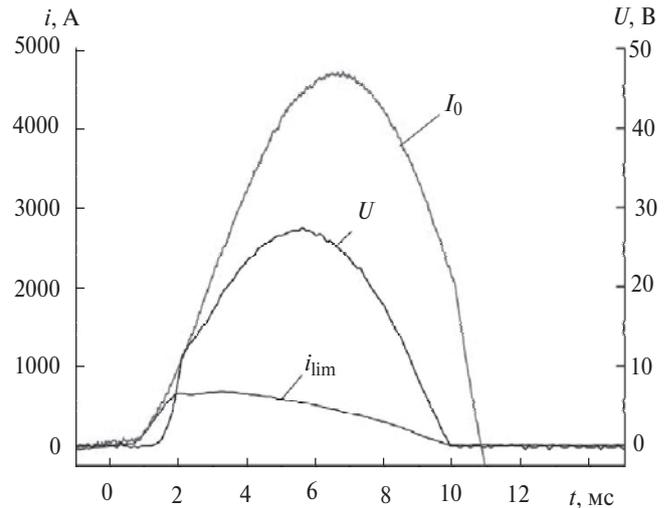


Рис. 2. Осциллограммы тока КЗ I_0 , тока ограничения i_{lim} и напряжения U для образца ВТСП элемента длиной 25 см

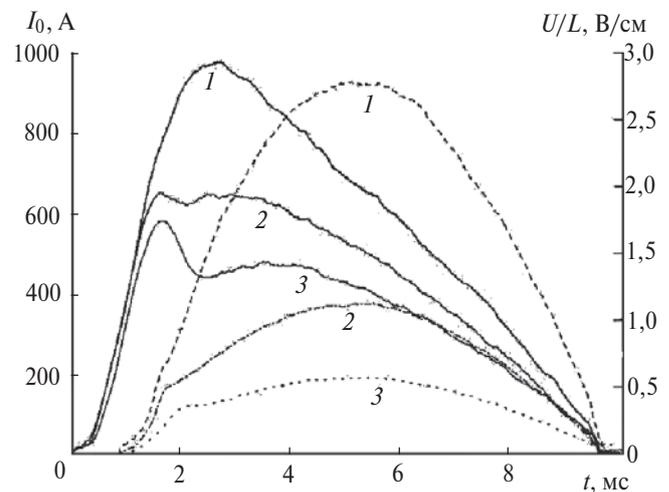


Рис. 3. Осциллограммы напряжения (---) и тока (—) в ленте ВТСП: 1 — длиной $L_{СП} = 10$ см; 2 — 25 см; 3 — 50 см

ния. Этот момент соответствует моменту нагрева ВТСП до температуры $T^3 80$ К и началу его перехода в нормальное состояние. Время перехода ВТСП из сверхпроводящего в нормальное состояние увеличивалось с уменьшением длины ленты от 1 мс до $1,5$ мс.

Для всех образцов ленты ВТСП было измерено сопротивление $R_{СП}(t) = U(t) / i_{lim}(t)$ ленты при $R_1 = 0$ в течение первой полуволны тока ограничения. Аналогичные измерения были выполнены для образца длиной $L_{СП} = 25$ см при $R_1 = 0,025; 0,05; 0,01$ Ом. Сопротивление ленты $R_{СП}(t) = U(t) / i_1$ в режиме охлаждения измерялось при протекании тока $i_1 = 0,7$ А после отключения выключателя K_2 .

Данные измерений $R_{СП}(t)$ использовались для определения температуры ленты $T(t) = T(R_{СП})$ в режиме нагрева и в режиме охлаждения. Значения температуры находились по измеренной в статике зависимости электрического сопротивления ленты

$r_{\text{СП}}$ (Ом/см) от температуры. Эта зависимость в диапазоне температур от 90 до 350 К для ленты типа SCF12050 с высокой точностью аппроксимируется выражением

$$r_{\text{СП}} = -0,04 + 0,0015T + 9,8 \cdot 10^{-7} T^2.$$

Изменение во времени температуры ленты $T(t)$ длиной $L_{\text{СП}} = 25$ см при разных значениях напряжения $u = U_{\text{max}} - iR_{\text{л}}$ показано на рис. 4.

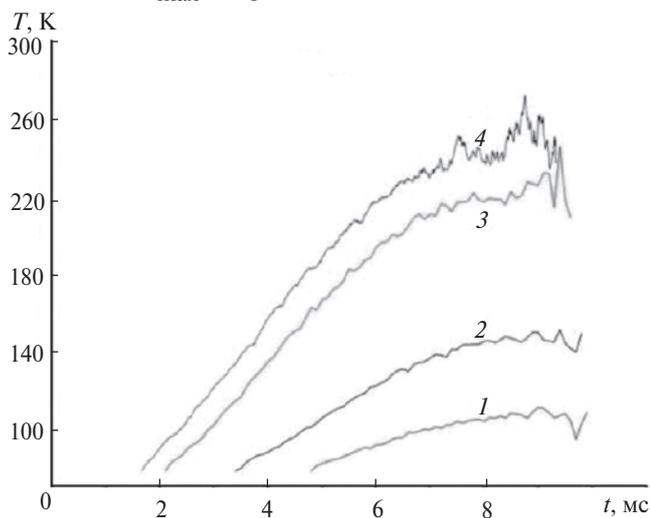


Рис. 4. Изменение во времени температуры ленты $T(t)$ длиной 25 см: 1 – $U=9,88$ В; 2 – 15,88 В; 3 – 27,52 В; 4 – 27,94 В

Максимальная температура T_{max} для всех испытанных образцов ленты достигалась в момент времени $t \gg 9$ мс перед нулем тока. Экспериментальные значения T_{max} , полученные при различных значениях напряжения u , представлены на рис. 5. Видно, что экспериментальные зависимости максимальной температуры $T_{\text{max}}(u)$ близки к линейной аппроксимации 2 (штриховая линия $T_{\text{max}} = 34,6 + 188u_{\text{max}}$). Расчетная кривая при $u_{\text{max}} > 0,5$ В/см практически совпадает с опытными данными.

В результате исследований охлаждения коротких образцов ленты было получено, что после нагрева ленты до температуры $T_{\text{max}} \sim 150$ К время восстановления было менее 0,4 с. Аналогичные результаты были получены в [14] при исследовании времени восстановления сверхпроводимости коротких образцов ленты ВТСП. После нагрева ленты до $T_{\text{max}} \gg 150$ К, 250 К время ее охлаждения в жидком азоте до температуры 90 К составляло от 0,4 до 1,2 с.

Испытание макетов ВТСП модуля в виде плоскопараллельной решетки. А. Объект исследования. Для изучения влияния конструктивных особенностей СОТ на его характеристики разработан и изготовлен ВТСП модуль на номинальный ток 350 А и напряжение до 4 кВ. В модуле используется ВТСП лента типа SF 12100 производства ком-

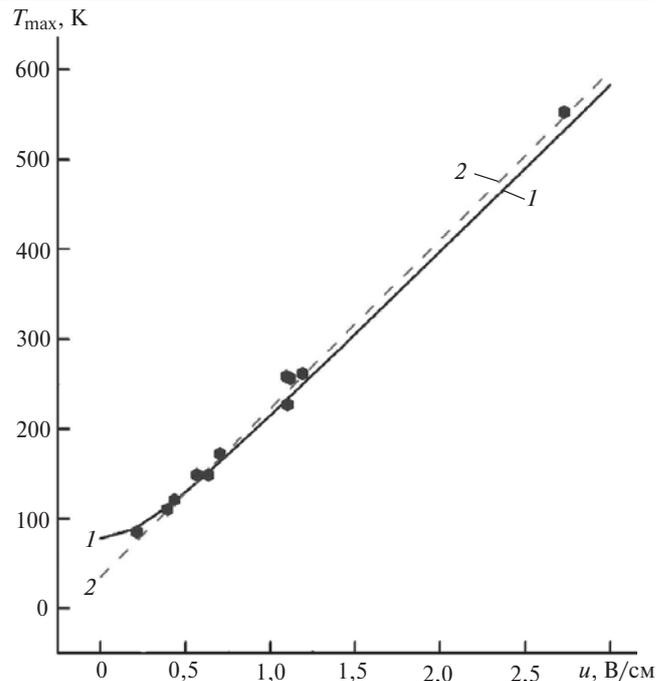


Рис. 5. Зависимость максимальной температуры ленты от напряжения: ● – эксперимент; 1 – расчет по формуле (4) для $T = 77$ К; 2 – линейная аппроксимация экспериментальных данных

пании SuperPower шириной 12 мм и толщиной 100 мкм. Критический ток ленты $I_c = 313$ А.

Модуль выполнен в виде плоскорешетчатой рамной конструкции. Каждая решетка модуля (рис. 6, а) представляет собой плоскую решетчатую раму в виде бифилярного меандра [6] и содержит две параллельные ВТСП ленты длиной по 5 м. Ленты в бифилярах своими подложками опираются на изоляционные части каркаса. При этом пондеромоторные силы от параллельных токов прижимают ленты к каркасу, что устраняет вибрации при переменном токе и обеспечивает устойчивость лент

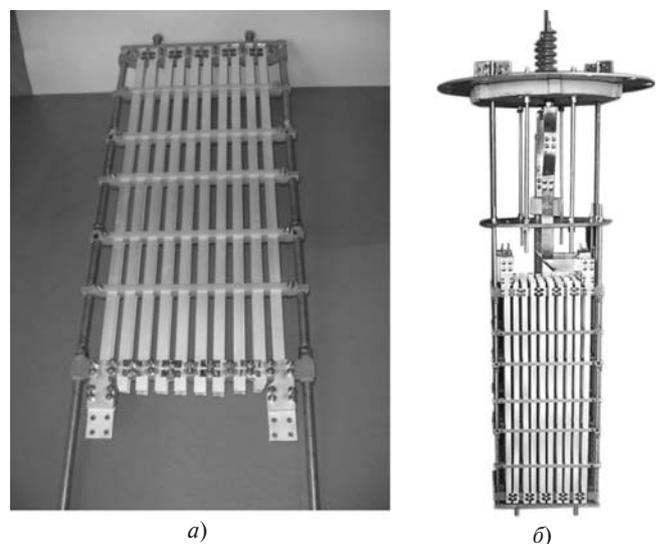


Рис. 6. Модуль ВТСП: а – одна решетка; б – сборка модуля с токовыми вводами

при температурных деформациях. Модуль содержит четыре последовательно соединенные решетки (рис. 6, б).

Плоскости решеток параллельны друг другу. При комнатной температуре сопротивления решеток $R_{S1} \gg R_{S2} \gg R_{S3} \gg R_{S4} \gg 1$ Ом, суммарное сопротивление модуля $R_S \gg 4$ Ом. Вследствие бифилярного исполнения была получена малая индуктивность одной решетки 1,9 мкГн. Суммарная индуктивность модуля 5 мкГн. Суммарная длина одной ленты $L_{\text{СП}} = 20$ м. Общая длина ленты в ВТСП модуле $L_S = 2L_{\text{СП}} = 40$ м. Модуль погружался в криостат с жидким азотом при атмосферном давлении.

Б. Условия исследований и методика измерений. Исследования характеристик коммутационного СОТ проводились на высоковольтном стенде на максимальное напряжение до 5 кВ. Стенд (рис. 7) состоит из зарядного устройства G , колебательного контура (источника напряжения), содержащего быстродействующий замыкатель, батарею конденсаторов емкостью C_0 до 10 мФ и реактор с регулируемой индуктивностью L_0 до 6 мГн. Замыкатель служит для подключения источника напряжения к конденсаторной батарее, предварительно заряженной до напряжения U_0 . Он выполнен в виде параллельно соединенных управляемого вакуумного разрядника (P_1) и вакуумного контактора K_1 . Стенд содержит также сопротивление R_1 и индуктивность L_1 , имитирующие нагрузку сети, и управляемый вакуумный разрядник P_2 для имитации КЗ.

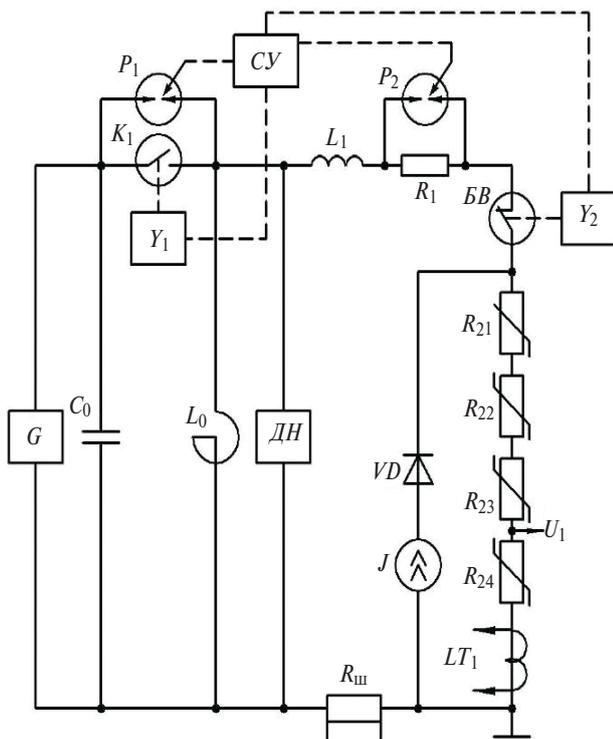


Рис. 7. Схема стенда переменного напряжения

Коммутационный СОТ содержал ВТСП модуль R_2 , быстродействующий вакуумный выключатель BB на напряжение 10 кВ, номинальный ток 1000 А, ток отключения 20 кА и систему управления (CU). Полное время отключения выключателя не превышало 7 мс. Параллельно ВТСП модулю через диодный блок VD подключался источник постоянного тока J . Такой стенд позволил изучить нагрев и время восстановления сверхпроводимости ВТСП модуля с токами до 1500 А при напряжении до 4 кВ.

Измерения тока i_0 в цепи колебательного контура проводились с помощью малоиндуктивного шунта с сопротивлением $R_{\text{ш}} = 0,87$ мОм. Сигнал с шунта подавался на вход осциллографа через оптическую развязку. Измерение тока i_{lim} в цепи СОТ проводилось с помощью гальванически развязанного датчика тока на основе эффекта Холла с чувствительностью 106 А/В. Напряжение на источнике питания измерялось с помощью гальванически развязанного датчика напряжения на основе эффекта Холла с коэффициентом деления 870. Электрические сигналы с датчиков тока и напряжения одновременно регистрировались с помощью пробников Р6139А и высоковольтных пробников типа Р5100 соответственно на двух осциллографах: осциллографе Tektronix TDS3014В и осциллографе Tektronix DPO 4034 с последующим сохранением и обработкой на персональном компьютере.

Во время исследований параметры колебательного контура ($C_0 = 10$ мФ, $L_0 \gg 1,4$ мГн) были подобраны таким образом, чтобы на испытуемом объекте формировалось синусоидальное напряжение с периодом порядка 23,5 мс (близкое к промышленной частоте). Волновое сопротивление колебательного контура $r = 0,37$ Ом.

Система управления выдавала сигналы на включение быстродействующих ключей P_1 и P_2 и на отключение BB . Время задержки сигнала на P_2 выбиралось таким образом, чтобы его включение происходило после первой полуволны номинального тока i_H через сопротивление R_1 . Время задержки сигнала на отключение BB выбиралось таким, чтобы контакты выключателя разошлись в конце первой полуволны тока КЗ. Отключение тока происходило при переходе тока через нуль. Амплитуда первой полуволны тока i_{lim} регулировалась изменением зарядного напряжения U_0 до 4 кВ. Амплитуда номинального тока при $U_0 = 4$ кВ составила 250 А.

В. Результаты исследований. Осциллограммы тока КЗ i_0 и тока ограничения i_{lim} представлены на рис. 8. После включения источника питания в цепи СОТ протекал переменный ток $i_H = 80,300$ А, ограниченный сопротивлением R_1 . В

момент включения разрядника P_2 наблюдался резкий всплеск тока i_{lim} с амплитудой I_{max} , а затем ток плавно спадал до нуля и отключался выключателем $БВ$.

При отсутствии ВТСП модуля амплитуда тока КЗ i_0 составила 9 кА. СОТ ограничивал этот ток на уровне, близком к 1 кА. Большая аperiodическая составляющая тока КЗ обусловлена малым индуктивным сопротивлением участка цепи с СОТ по сравнению с сопротивлением источника напряжения. Длительность режима ограничения $Dt \approx 10$ мс определялась отключением тока выключателем в первом нуле тока.

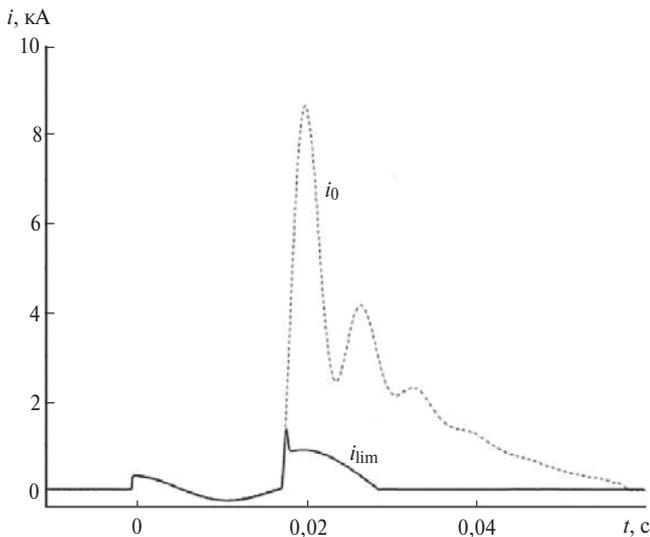


Рис. 8. Осциллограммы тока КЗ i_0 и тока ограничения i_{lim} при $U_0 = 4$ кВ

Для режима токоограничения на рис. 9 показаны характерные осциллограммы тока и напряжения на четвертой решетке ВТСП модуля при зарядном напряжении U_0 . При появлении всплеска тока $U, В$

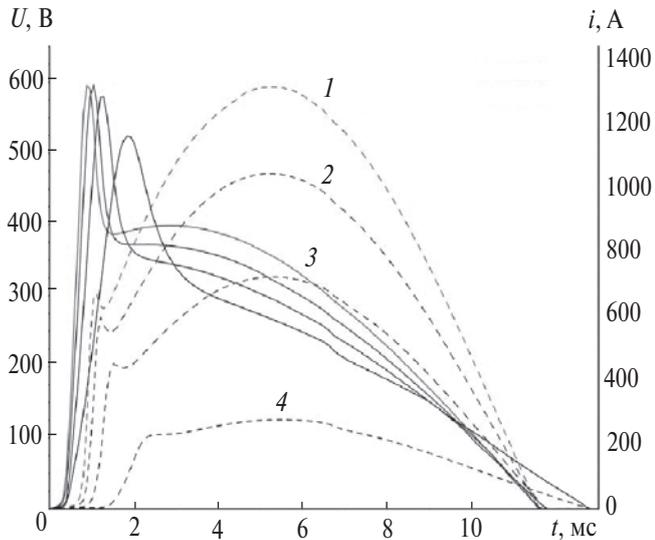


Рис. 9. Осциллограммы напряжения (---) и тока (—) в ВТСП модуле при зарядном напряжении $U_0 = 1, 4$ кВ: 1 — 4000 В; 2 — 3000 В; 3 — 2000 В; 4 — 1000 В

наблюдалось заметное напряжение на ВТСП модуле, которое быстро увеличивалось с ростом тока.

С увеличением зарядного напряжения U_0 скорость нарастания тока di_{lim}/dt увеличивалась и соответственно уменьшался интервал времени между началом тока КЗ и моментом появления заметного напряжения на ВТСП элементе — время перехода ВТСП в нормальное состояние. С увеличением U_0 форма тока все ближе приближалась к синусоидальной форме. При увеличении U_0 до 4 кВ амплитуда всплеска тока увеличилась до $I_{\text{max}} \approx 1300$ А, а ток ограничения (ток сразу после всплеска тока) возрастал примерно до 900 А.

При анализе данных измерений полагалось, что токи в двух параллельных лентах ВТСП модуля одинаковые. Изменение сопротивления одной ленты ВТСП определялось как $R_{\text{пор}}(t) = 2U(t)i_{\text{lim}}L_{\text{СП}}$ (здесь $L_{\text{СП}}$ — длина одной ленты). Воспользовавшись известной зависимостью сопротивления ленты от температуры $r_{\text{СП}}(\text{мОм/см}) \approx 0,52 + 0,014T(\text{К})$, было найдено изменение температуры ленты $T(t)$ при различных значениях напряжения $u = U_{\text{max}}/L_{\text{СП}}$. В течение режима токоограничения температура ленты увеличивалась от $T_0 \approx 90$ К до максимальной температуры T_{max} перед отключением тока. Так же как и в образцах с короткой лентой (рис. 5), температура $T_{\text{max}}(\text{К}) \approx 23 + 158u$ (В/см) практически линейно возрастала с увеличением u .

Охлаждение ВТСП модуля определялось изменением сопротивления ленты при пропускании постоянного тока 1 А от источника J сразу после отключения тока выключателем. Время восстановления сверхпроводящего состояния ВТСП определялось временем охлаждения ленты $t_{\text{охл}}$ от температуры T_{max} до температуры 90 К (рис. 10, 2). На рис. 10 также показано время (t_1) уменьшения сопротивления ленты до нуля ($R_{\text{СП}} \approx 0$). Полученные

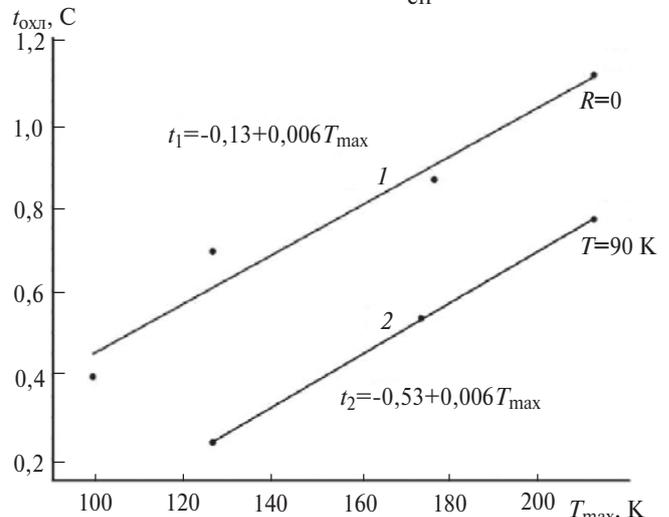


Рис. 10. Зависимость времени восстановления ВТСП от T_{max}

При включении K_1 через СТВ начинал протекать разрядный ток i_0 с периодом $T_0 = 24$ мс. Амплитуда тока I_m регулировалась изменением зарядного напряжения U_0 . При замкнутых контактах выключателя $БВ$ ток i_0 в разрядной цепи равен току i_S в ВТСП модуле.

После превышения током i_S критического значения I_c ВТСП выходил из состояния сверхпроводимости. На модуле появлялось падение напряжения U_S , которое быстро увеличивалось. Напряжение U_S подавалось в систему управления СУ. При превышении порогового значения напряжения система управления вырабатывала сигнал на выключение $БВ$ и на включение вакуумного разрядника P . Включение разрядника проводилось с временной задержкой d относительно сигнала на выключение $БВ$. Задержка $d \gg 9$ мс выбиралась так, чтобы контакты выключателя разводились на максимальное расстояние, равное 4 мм.

При включении разрядника P в цепи выключателя начинал протекать противоток i_C , амплитуда которого $I_C = U_C / \sqrt{C_1 L_1} > i_S$. При этом суммарный ток в выключателе $БВ$ спадал до нуля и происходило отключение тока i_S , протекавшего в ВТСП модуле. Время восстановления сверхпроводящего состояния в ВТСП после нуля тока определялось измерением времени уменьшения сопротивления ВТСП модуля при протекании постоянного тока (1 А) источника J .

В процессе проведения испытаний разрядный ток i_0 и ток i_S измерялись с помощью датчиков тока LT_1 (LT1000-SI/SP58) и LT_2 (LT1000-SI/SP69) соответственно. Напряжение на решетках ВТСП модуля измерялось с помощью высоковольтного пробника типа P5100 фирмы Tektronix. Напряжение на СТВ измерялось датчиком напряжения ДН2 типа CV-3-1500 фирмы LEM. Электрические сигналы регистрировались цифровыми осциллографами Tektronix TDS3024B и TDS3014B с последующей обработкой осциллограмм на ПК.

Результаты исследований. Осциллограммы токов и напряжений, полученные в режиме токоограничения при напряжении $U_0 = 3$ кВ, представлены на рис. 13. Для сравнения штриховой линией на рис. 13 показан ожидаемый ток КЗ i_0 при $U_0 = 3$ кВ. При превышении током критического значения тока в ленте I_c на ВТСП модуле возникало напряжение U_S . Отключение тока в выключателе происходило примерно через 9 мс после возникновения напряжения на ВТСП модуле.

В момент отключения тока i_S на выключателе быстро восстанавливалось напряжение $U \gg L_0 di_S / dt$, которое ограничивалось на уровне ~ 9 кВ с помощью нелинейного сопротивления R_1 . В этом ре-

жиме нелинейное сопротивление быстро шунтировало последовательно соединенные вакуумный выключатель и ВТСП модуль и ток разрядного контура перетекал из ВТСП модуля в нелинейное сопротивление. Энергия, накопленная в индуктивности L_0 , выделялась в нелинейном сопротивлении R_1 , и полный ток в разрядной цепи спадал до нуля в течение примерно 1 мс (штриховая линия).

Были измерены также изменения во времени тока i_S и напряжения U_{12} на двух решетках ВТСП модуля при других значениях зарядного напряжения $U_0 = 2,5$ кВ и $U_0 = 2$ кВ. Из анализа осциллограмм следует, что с уменьшением напряжения U_0 увеличивался интервал времени от начала тока до момента возникновения напряжения на ВТСП модуле. Это обусловлено уменьшением скорости нарастания тока в разрядной цепи $di/dt \gg U_0 / L_0$ с уменьшением U_0 . Согласно алгоритму работы системы управления выключателя отключение тока всегда происходило через 9 мс после возникновения напряжения на ВТСП модуле. Поэтому с уменьшением U_0 осциллограмма напряжения сдвигалась относительно начала тока вправо как целое. Соответственно с уменьшением U_0 уменьшался и отключаемый ток.

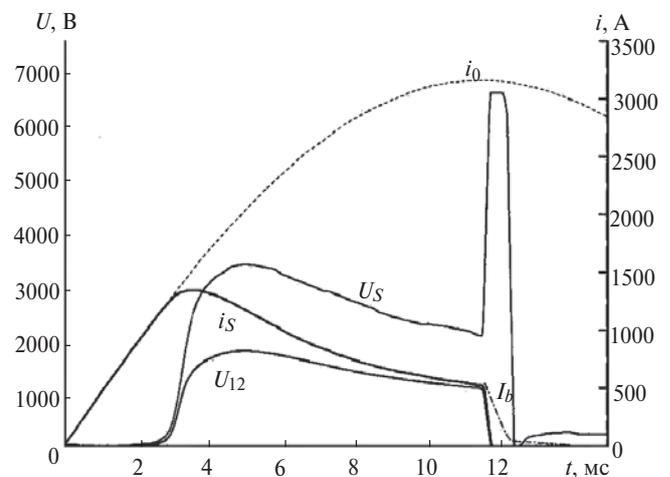


Рис. 13. Осциллограммы токов и напряжений в режиме ограничения тока КЗ при $U_0 = 3$ кВ: i_S — ток в ВТСП модуле; i_b — ток в разрядной цепи; i_0 — ток КЗ; U_S — падение напряжения на СТВ; U_{12} — падение напряжения на первых двух решетках модуля

При определении температуры ленты предполагалось равномерное деление тока в двух параллельных лентах. Температура одной ленты решетки в момент времени t находилась сопоставлением измеренного в эксперименте сопротивления $R_{12}(t) = 2U_{12}(t) / i_S(t)$ одной ленты длиной $L_{СП}$ с известным значением сопротивления ленты $L_{СП} r_{СП}(T)$ при температуре T .

Были также проведены измерения нагрева ВТСП при пропускании тока через пару решеток

или через одну решетку. Из анализа всех данных измерений нагрева ленты последовательных решеток (две параллельные ленты) в течение первых 7 мс от начала протекания тока была получена зависимость $T_{2\max}$ от напряжения $u = 2U_{\max1,2} / L_{\text{сп}1,2}$. Здесь $U_{\max1,2}$ и $L_{\text{сп}1,2}$ — напряжение и длина ленты одной или пары решеток соответственно. Зависимость $T_{2\max}$ от напряжения u удовлетворительно аппроксимируется прямой линией независимо от длины ленты (рис. 14).

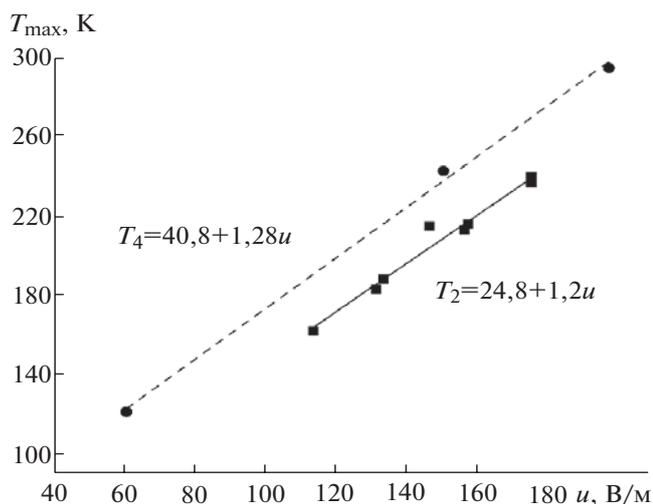


Рис. 14. Зависимость максимальной температуры ленты ВТСП в конце режима токоограничения длительностью 7 мс от напряжения u : T_2 — две параллельные ленты ВТСП, T_4 — четыре параллельные ленты

Нагрев ВТСП измерялся также при параллельном соединении двух последовательно соединенных решеток (четыре параллельные ленты). Результаты обработки данных этих измерений представлены на рис. 14. Видно, что и в этом случае зависимость $T_{4\max}(u)$ удовлетворительно аппроксимируется прямой линией. Только средняя температура четырех параллельных лент оказалась выше средней температуры двух параллельных лент. Такое различие может быть обусловлено неравномерным делением тока между решетками ВТСП модуля при их параллельном соединении.

Время t_{rec} восстановления сверхпроводимости ВТСП определялось так же, как в случае охлаждения ленты ВТСП при переменном напряжении. Найденная таким образом зависимость t_{rec} от T_{\max} близка к линейной зависимости, представленной на рис. 10. При нагреве ленты до $T_{\max} \gg 240$ К время t_{rec} не превышало 1,2 с. После возвращения ВТСП в сверхпроводящее состояние сверхпроводниковый токоограничивающий выключатель снова был готов к работе.

Заключение. Найденные зависимости максимальной температуры нагрева лент ВТСП второго поколения SF 12100 и SF12050 от напряжения

вдоль длины ленты имеют линейный характер для всех исследованных лент и видов напряжения (переменное или постоянное). Вид ленты и характер изменения напряжения влияют только на скорость увеличения температуры T_{\max} с увеличением напряжения. Эти зависимости позволяют для данного вида напряжения и заданного тока ограничения оценить необходимую длину ленты в ВТСП модуле и число параллельно и последовательно соединённых ВТСП модулей.

Выполненные эксперименты продемонстрировали эффективность предложенного подхода к проблеме ограничения и отключения тока короткого замыкания в цепях постоянного тока. В режиме токоограничения лента ВТСП нагревалась до температуры $T_{\max} \gg 250$ К, не превышающей допустимую температуру $T_{\text{доп}} \gg 290$ К. Допустимый нагрев ленты обеспечивался выбранной суммарной длиной сверхпроводящей ленты $L_S = 40$ м в ВТСП модуле и длительностью режима токоограничения 9 мс. Коэффициент ограничения тока при напряжении 3 кВ составил $k_{\text{огр}} \gg 6$.

Время восстановления сверхпроводимости ВТСП зависит от интенсивности его охлаждения и определяется конструктивным исполнением ВТСП модуля. Выбранная конструкция ВТСП модуля обеспечила время восстановления сверхпроводящего состояния ВТСП при нагреве ленты до 250 К не более 1,2 с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kalsi S., Malozemoff A. HTS Fault Current Limiter Concept. — Proc. of IEEE Power Engineering Society Meeting, June 2004.
2. Alferov D., Budovsky A., Dul'kin I. et al. Study of superconducting fault current limiter model with AC circuit-breaker. — IEEE/CSC & ESAS European Superconductivity News Forum (ESNF), January 2009, No 11.
3. Hori T., Otani A., Kaiho K. et al. Study of superconducting fault current limiter using vacuum interrupter driven by electromagnetic repulsion force for commutating switch. — IEEE Trans. Appl. Supercond., 2006, vol. 16, No.4.
4. Alferov D., Yevsin D., Fisher L. et al. Superconducting fault current limiter with fast vacuum commutation modulus. — Journal of Physics: Conference Series, 2008, 97.
5. Hyung Hee Yoon. A New Project on Applying 22.9kV HTS Cables and SFCL to KEPCO Power Grid. — Superconductivity Conf. (EPRI), Oak Ridge, Nov. 11, 2008.
6. Алферов Д.Ф., Ахметгареев М.Р., Будовский А.И. и др. Сверхпроводящий выключатель постоянного тока. — Изв. АН Энергетика, 2011, №4.
7. Noe M., Steurer M., High-temperature superconductor fault current limiters: concepts, applications, and development status. — Supercond. Sci. Technol., 2007, 20. R15–R29.
8. Superconducting Fault Current Limiters: Technology Watch 2009. — EPRI, Palo Alto, CA, 2009.
9. Park D.K., Ahn M.C., Yang S.E. et al. Development of 220 V/300 A Class Non-Inductive Winding Type Fault Current Limiter

Using 2G HTS Wire. – IEEE Trans. Appl. Supercond., June 2007, vol. 17, No. 2.

10. **Kraemer H.-P., Schmidt W., Wohlfart M. et al.** Progress in high temperature superconductor coated conductors and their applications. – Journal of Physics: Conference Series, 2008.

11. **Werner Prusseit.** IEEE/CSC & ESAS European Superconductivity News Forum, April 2008, No. 4.

12. **Yang S.E., Park D.K., Ahn M.C. et al.** Manufacture and Test of the Bifilar Wound Coil Using Coated Conductor With Stainless Steel Stabilizer. – IEEE Trans. Appl. Superconductivity, June 2007, vol. 17, No. 2.

13. **Llambes J. H., Weber C.S., Hazelton D.W.** Testing and Demonstration Results for the Transmission-Level (138kV) 2G Superconducting Fault Current Limiter at Super Power. – 4LY07 ASC 2008 Preprint.

14. **Alferov D.F., Degtyarenko P.N., Dul'kin I.N. et al.** Thermal Behavior of 2GHTS tape for use in resistive fault current limiters. – Journal of Physics: Conference Series, 2010, 234.

[23.01.12]

Авторы: **Алферов Дмитрий Федорович** окончил факультет автоматики и телемеханики Московского инженерно-физического института (МИФИ) в 1969 г. В 2010 г. защитил докторскую диссертацию «Физико-технические основы создания вакуумных электрических аппаратов для коммутации импульсных и постоянных токов» во Всероссийском электротехническом институте (ФГУП ВЭИ). Главный сотрудник ВЭИ.

Ахметгареев Марат Рифатович окончил факультет автоматики и электроники МИФИ (ГУ) в 2008 г. Младший научный сотрудник ВЭИ.

Будовский Александр Исаакович окончил энергомашиностроительный факультет МЭИ в 1963 г. Старший научный сотрудник ВЭИ.

Бунин Роман Алексеевич окончил Институт электротехники МЭИ (ТУ) в 2011 г. Младший научный сотрудник ВЭИ.

Волошин Игорь Федорович окончил физический факультет Московского государственного университета в 1969 г. В 1978 г. защитил кандидатскую диссертацию «Экспериментальное исследование импеданса компенсированных металлов и роли поверхностного рассеяния электронов». Ведущий научный сотрудник ВЭИ.

Евсин Дмитрий Викторович окончил Институт электротехники МЭИ в 2003 г. В 2009 г. в ВЭИ защитил кандидатскую диссертацию «Отключение постоянного тока вакуумным коммутационным аппаратом с аксиально-симметричным поперечным магнитным полем». Старший научный сотрудник ВЭИ.

Иванов Валерий Павлович окончил электроэнергетический факультет Московского энергетического института (МЭИ) в 1972 г. Начальник сектора ВЭИ.

Сидоров Владимир Алексеевич окончил электромеханический факультет МЭИ в 1974 г. В 1990 г. защитил кандидатскую диссертацию «Исследование и разработка вакуумных управляемых разрядников отпаянной конструкции для импульсных источников энергии» в ВЭИ. Ведущий научный сотрудник ВЭИ.

Фишер Леонид Михайлович окончил Московский физико-технический институт в 1964 г. В 1978 г. защитил докторскую диссертацию «Доплироны в металлах». Начальник отдела ВЭИ.

Цхай Евгения Викторовна окончила факультет электронной техники МЭИ в 1985 г. Научный сотрудник ВЭИ.

* * *

Уважаемые авторы!

Редакция публикует при каждой статье краткие сведения об авторах. В связи с этим просим вас при направлении статьи в редакцию сообщать:

полные имена и отчества всех авторов;

какой факультет, какого вуза и когда закончил;

когда получил ученую степень, где и по какой тематике (теме) была защита; место работы и должность.

Кроме того, напоминаем, что на каждую статью следует представлять краткий (4–5 предложений) реферат на русском и английском языках (включая название), а также ключевые слова.