

05

## Влияние скорости нарастания тока на переходные процессы в сверхпроводниковом ограничителе тока

© Д.Ф. Алферов, М.Р. Ахметгареев, Д.В. Евсин, И.Ф. Волошин, А.В. Калинов,  
Л.М. Фишер, Е.В. Цхай

Акционерное общество Научно-исследовательский институт технической физики и автоматизации (АО „НИИТФА“),  
115230 Москва, Россия  
e-mail: DFAIferov@niitfa.ru

(Поступило в Редакцию 22 апреля 2017 г.)

Экспериментально исследовано влияние скорости нарастания тока до 1700 А/мс на характеристики перехода блоков сверхпроводниковых (ВТСП) модулей из сверхпроводящего в нормальное состояние. Блоки отличались критическим током ВТСП ленты и конструктивным исполнением. Блоки ВТСП модулей используются в составе сверхпроводникового ограничителя тока (СОТ) резистивного типа для сетей переменного и постоянного токов. Полученные зависимости следует учитывать при проектировании резистивных СОТ.

DOI: 10.21883/JTF.2018.01.45477.2305

### Введение

За годы существования высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) второго поколения их критические токи выросли на порядки, что позволяет говорить о реальных возможностях практического применения данного класса ВТСП материалов. Для этого необходимо знать физические свойства таких материалов, в частности критическую плотность тока  $J_C$  и вольт-амперные характеристики (ВАХ). Последние иллюстрируют переход ВТСП из сверхпроводящего состояния в нормальное. На ВАХ условно можно выделить три участка (стадии): сверхпроводящий (flux-free), переходной (flux-flow) и нормальный (металлический) [1]. При плотностях транспортного тока ниже критического значения  $J_C$  магнитное поле тока проникает в объем сверхпроводника в виде вихрей Абрикосова, которые в первом приближении неподвижны, поскольку удерживаются силами пиннинга (сверхпроводящее состояние). По мере роста плотности тока увеличивается сила Лоренца, действующая на вихрь, и при превышении критической плотности тока  $J_C$  вихри начинают двигаться. Движение вихрей приводит к генерации электрического поля и появлению диссипации. Сверхпроводник переходит в резистивное состояние (переходное состояние), и электрическое поле в проводнике начинает быстро увеличиваться. Этот диссипативный процесс приводит к увеличению температуры сверхпроводника. Увеличение температуры ВТСП приводит к уменьшению критической плотности тока.

В этих состояниях ВАХ ВТСП обычно аппроксимируется степенной функцией

$$E(J, T) = E_C \left( \frac{J}{J_C(T)} \right)^\alpha, \quad (1)$$

где  $E_C = 1 \mu\text{В}/\text{см}$  — критерий для определения критической плотности тока  $J_C(T)$ , которая зависит от темпе-

ратуры сверхпроводника  $T$ ,  $\alpha$  — степенной показатель, который зависит от тока и температуры и изменяется для каждой стадии.

В сверхпроводящем состоянии плотность тока  $J$  в сверхпроводнике меньше критической плотности тока, и сопротивление проводника очень мало. Это состояние характеризуется крутым участком ВАХ со степенным показателем  $\alpha > 30$  [2]. В узком диапазоне температур  $T_0 < T < T_C$  критическая плотность тока уменьшается линейно с увеличением температуры [3]

$$J_C(T) = J_{C0} \left( 1 - \frac{T - T_0}{T_C - T_0} \right). \quad (2)$$

Здесь  $T_C$  — критическая температура ВТСП ленты,  $J_{C0}$  — критическая плотность тока при температуре  $T_0$ . Когда температура ВТСП становится выше критической температуры  $T > T_C$ , сверхпроводник переходит в нормальное состояние, и начинается режим заметного ограничения роста тока.

Представленные выше характеристики ВТСП используются в резистивном сверхпроводниковом ограничителе тока (СОТ), который является принципиально новым электротехническим устройством, выполняющим защитную функцию в энергосистемах. При возникновении тока короткого замыкания (КЗ) в сети начинает возрастать ток  $i$ , скорость нарастания которого  $di/dt \sim U_0/L_0$  зависит от напряжения  $U_0$  и индуктивности сети  $L_0$ . При превышении током  $i$  критического тока  $I_C = SJ_C$ , где  $S$  — площадь сечения ВТСП ленты, сверхпроводник переходит из сверхпроводящего в резистивное состояние. Начинается режим ограничения тока за счет введения в сеть активного сопротивления ВТСП ленты, величина которого увеличивается с ростом тока. Быстрое увеличение сопротивления ВТСП ленты в резистивном режиме обусловлено как сильно нелинейной ВАХ сверхпроводника, так и последующим увеличением температуры

ленты  $T$  вследствие ее нагревания протекающим током и переходом в нормальное (металлическое) состояние.

Переходные характеристики такого устройства зависят от исполнения СОР и материала ВТСП ленты. Скорость нагрева ВТСП ленты протекающим током увеличивается с увеличением скорости нарастания тока  $di/dt$  при возникновении КЗ [4–6]. Соответственно должна уменьшаться длительность переходной стадии и изменяться ток перехода ВТСП в нормальное состояние. Эти основные параметры резистивного СОР влияют на устойчивость ВТСП к аварийным воздействиям, что важно для практических применений. Однако анализ влияния  $di/dt$  на развитие переходного режима СОР в настоящее время слабо отражен в литературе. Адекватное моделирование переходных процессов в таком устройстве является непростой задачей вследствие сильной нелинейности ВАХ и возможной неоднородности ВТСП лент.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований переходных процессов в блоках ВТСП модулей СОР при разных скоростях нарастания тока КЗ до 1700 А/мс. Такие режимы характерны для токов КЗ в сетях постоянного тока электрифицированного транспорта. Блоки отличались критическим током ВТСП ленты и конструктивным исполнением.

### Объект исследований

Объектом исследований являлись блоки ВТСП модулей, предназначенные для использования в составе резистивного СОР постоянного тока. Блоки размещались в криостате с жидким азотом при температуре  $T = 77$  К. Исследовались два блока ВТСП модулей Бл1 и Бл2, отличающихся ВТСП лентой и конструктивным исполнением (табл. 1).

Блок Бл1 содержит девять модулей: три последовательно соединенных звена, каждое из которых содержит три параллельно соединенных модуля [7]. Блок Бл2 содержит четыре последовательно соединенных ВТСП модуля. Сверхпроводниковые блоки Бл1 изготовлены из ВТСП ленты производства компании СуперОкс шириной 12 мм. Подложка лент изготовлена

**Таблица 1.** Параметры блоков ВТСП модулей

Наименование	Бл1	Бл2
Производитель ВТСП ленты	СуперОкс	SuNAM
Напряжение, кВ	3.5	4
Номинальный ток, А	2000	2000
Число параллельных ВТСП лент	12	4
Длина ВТСП ленты, $l_b$ , м	31.5	40.8
Критический ток блока модулей, $I_{Cb}$ , А	3600	2800
Сопrotивление блока при $T_c = 93$ К, $\Omega$	0.26	1.22

**Таблица 2.** Параметры ВТСП модулей

Наименование	M1	M2
Производитель ВТСП ленты	СуперОкс	SuNAM
Материал подложки	Hastelloy C276	STS 310 S
Длина ВТСП ленты, м	10.5	10.2
Число параллельных ВТСП лент	4	4
Критический ток ленты, $I_c$ , А	300	700
Критический ток модуля, $I_{Cmod}$ , А	1200	2800
Сопrotивление модуля при $T_0 = 93$ К, $\Omega$	0.26	0.305

из сплава Hastelloy C276 толщиной 100  $\mu$ м. Критический ток ВТСП ленты производства компании СуперОкс  $I_{C1} = 300$  А.

Блок Бл2 изготовлен из ВТСП ленты производства компании SuNAM шириной 12 мм. Подложка лент изготовлена из сплава STS 310 S толщиной 105  $\mu$ м. Критический ток ВТСП ленты производства компании SuNAM  $I_{C2} = 700$  А.

Сверхпроводниковые ленты покрыты слоем серебра толщиной 3  $\mu$ м и начинают переходить из сверхпроводящего в нормальное состояние при температуре  $T_c = 93$  К.

Каждый ВТСП модуль содержит шесть последовательно соединенных плоских элементов [7]. Элемент содержит четыре параллельные ВТСП ленты, наложенные бифилярно с двух сторон стеклотекстолитовой основы. Параметры модулей M1 и M2 представлены в табл. 2.

### Условия и методы исследований

Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Установка состоит из конденсаторной батареи емкостью  $C_0 \approx 44$  мФ на максимальное напряжение 6 кВ и реактора с индуктивностью  $L_0 \approx 2.6$  мН. В качестве объекта исследований использовался блок ВТСП модулей  $R_2$ , последовательно соединенный с быстродействующим вакуумным выключателем (БВВ) (очерчен штриховой линией). БВВ содержит вакуумную дугогасительную камеру ( $Q$ ), контур протivotока ( $L_1, C_1, Q_1$ ) и ограничитель перенапряжений  $R_1$  [8]. Образец исследований подключался к предварительно заряженной конденсаторной батарее с помощью разрядника  $Q_2$ . Шунтирующий разрядник  $Q_3$  предназначен для защиты исследуемого объекта в случае отказа выключателя.

Перед каждым испытанием контакты выключателя были замкнуты. После включения разрядника  $Q_2$  в цепи начинал протекать разрядный ток  $i$ , амплитуда  $I_m$  и

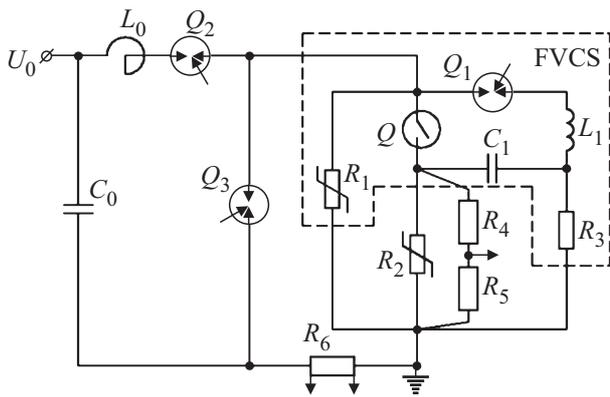


Рис. 1. Схема испытаний.

максимальная скорость нарастания  $(di/dt)_{\max} = U_0/L_0$  которого задавались уровнем зарядного напряжения  $U_0$ .

Измерение тока  $i$  производилось с помощью шунта с сопротивлением  $R_6 = 0.154 \text{ м}\Omega$ . Напряжение на исследуемом объекте  $R_2$  измерялось с помощью омического делителя  $R_4-R_5$  с коэффициентом деления 221. Электрические сигналы с датчиков тока и напряжения одновременно регистрировались на осциллографе Tektronix DPO 4034 с последующим сохранением и обработкой на персональном компьютере.

По значениям напряжения и тока через исследуемый объект определялась величина сопротивления  $R_2(t)$  в режиме ограничения тока до момента его отключения вакуумным выключателем. Зависимость  $R_2(t)$  использовалась для оценки температуры ВТСП ленты [7].

## Результаты исследований блоков ВТСП модулей

Первая серия исследований в режиме имитации короткого замыкания проводилась на блоке Бл1 (табл. 1) с ВТСП лентой (СуперОкс),  $I_{cb1} = 3600 \text{ А}$ . Зарядное напряжение батареи конденсаторов  $U_0$  изменялось от 2600 до 4000 В.

Зависимости тока  $i(t)$  и напряжения  $U(t)$  (а) от времени  $t$  и найденные из этих зависимостей изменения сопротивления блока ВТСП модулей (b) для разных  $(di/dt)_{\max}$  представлены на рис. 2.

Вторая серия исследований в режиме имитации короткого замыкания проводилась на блоке Бл2 (табл. 1) с ВТСП лентой (SuNAM),  $I_{cb2} = 2800 \text{ А}$ . Зарядное напряжение батареи конденсаторов  $U_0$  изменялось от 2000 до 4100 В. Зависимости тока  $i(t)$ , напряжения  $U(t)$  (а) от времени  $t$  и найденные из этих зависимостей изменения сопротивления блока Бл2 (b) для разных  $(di/dt)_{\max}$  представлены на рис. 3.

Из рис. 2 и 3 найдены ВАХ блоков ВТСП модулей Бл1 и Бл2 для разных  $(di/dt)_{\max}$  (рис. 4).

## 1. Анализ результатов измерений

Из рис. 2 и 3 видно, что изменения тока и напряжения во времени в разных блоках ВТСП модулей (Бл1 и Бл2) имеют общие тенденции. С ростом тока  $i$  ВТСП сохранял сверхпроводимость вплоть до достижения критического тока  $i = I_{cb1} = 3600 \text{ А}$  (рис. 2, а) и  $i = I_{cb2} = 2800 \text{ А}$  (рис. 3, а). В этом интервале изменения тока скорость роста тока  $di/dt = (di/dt)_{\max}$  можно считать постоянной для каждого опыта. При превышении критического тока ВТСП начинал переходить из сверхпроводящего в переходное резистивное состояние, что проявлялось в виде появления напряжения на блоке ВТСП модулей. С увеличением  $(di/dt)_{\max}$  наблюдался сдвиг кривых напряжения в сторону меньших времен, т.е. быстрее достигалось критическое значение тока. Это отражалось на ВАХ (рис. 4) в виде смещения кривых 1–3 (Бл1) и кривых 4–8 (Бл2) в сторону больших токов, т.е. при одном и том же напряжении на блоке ВТСП модулей ток перехода увеличивался.

Форма изменения напряжения на блоке ВТСП модулей характеризуется участком с быстрым увеличением крутизны роста напряжения  $dU/dt$  при  $i > I_{cb1} = 3600 \text{ А}$  (рис. 2, а) и при  $i > I_{cb2} = 2800 \text{ А}$  (рис. 3, а) с последу-

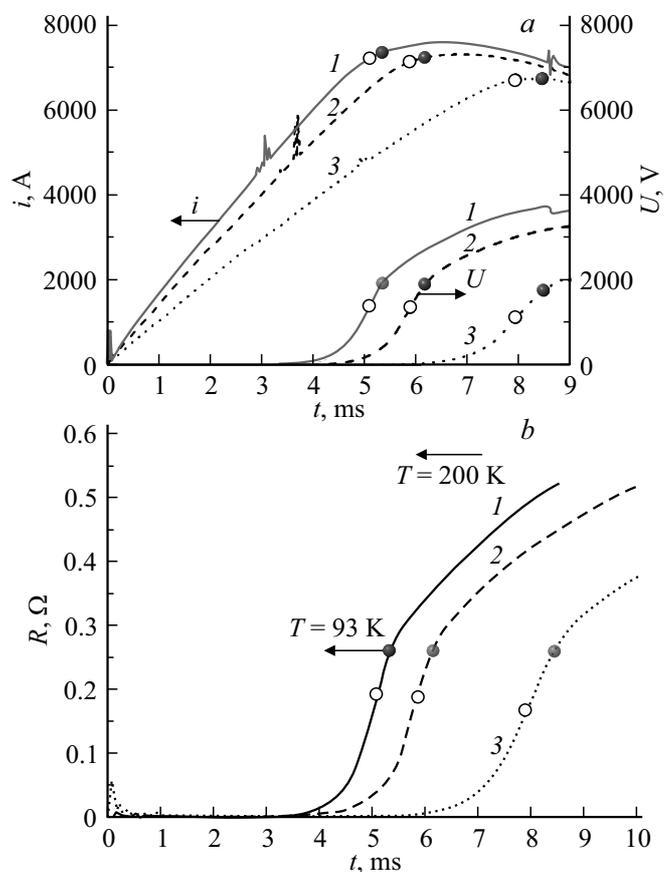
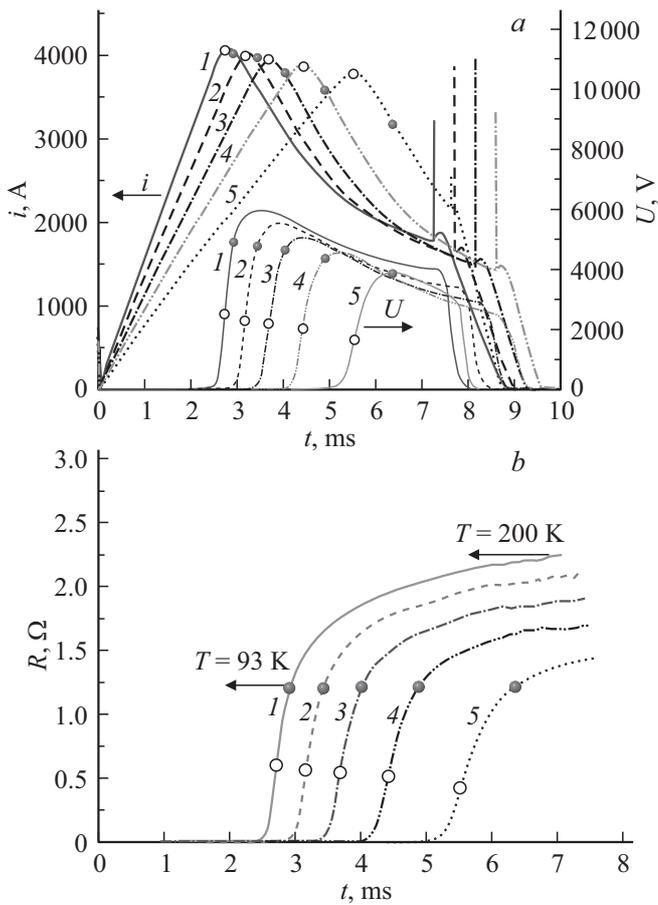


Рис. 2. Изменения напряжения  $U(t)$  и тока  $i(t)$  — (а), и сопротивления  $R(t)$  — (b) блока ВТСП модулей Бл1 при разных  $(di/dt)_{\max}$ : 1 — 1670, 2 — 1440, 3 — 1007 А/мс



**Рис. 3.** Изменения напряжения  $U(t)$  и тока  $i(t)$  — (a), и сопротивления  $R(t)$  — (b) блока ВТСП модулей Бл2 при разных  $(di/dt)_{max}$ : 1 — 1570, 2 — 1340, 3 — 1150, 4 — 970, 5 — 760 A/ms.

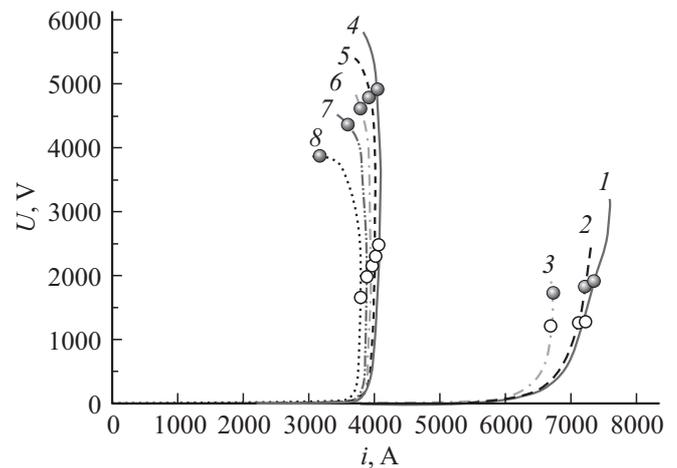
ющим заметным замедлением роста напряжения. Аналогичный перегиб наблюдался и в зависимости сопротивления  $R(t)$  блока ВТСП модулей  $R = U/i$  (рис. 2, b, 3, b).

Участок кривой с крутым ростом напряжения определим как процесс перехода ВТСП из сверхпроводящего состояния в резистивное состояние (flux-flow). Этот переходный процесс начинал заметно проявляться (быстрый рост напряжения и сопротивления), когда сверхпроводник нагревался протекающим током до температуры  $T > 77$  К, и завершался в момент  $t_n$  при нагреве ВТСП до температуры  $T_C \approx 93$  К. При  $T \approx 93$  К сопротивление блока модулей Бл1 равно сопротивлению одного модуля и составляет  $R_{n1} \approx 0.26 \Omega$  (рис. 2, b), а сопротивление блока модулей Бл2, составляет  $R_{n2} \approx 1.22$  или  $0.305 \Omega$  на один модуль (рис. 3, b). На рис. 2–4 сплошными кружками ( $\bullet$ ) помечены ток  $i_n$ , напряжение  $U_n$  и сопротивление  $R_n$  в момент  $t_n$  перехода ВТСП в нормальное состояние при разных  $(di/dt)_{max}$ .

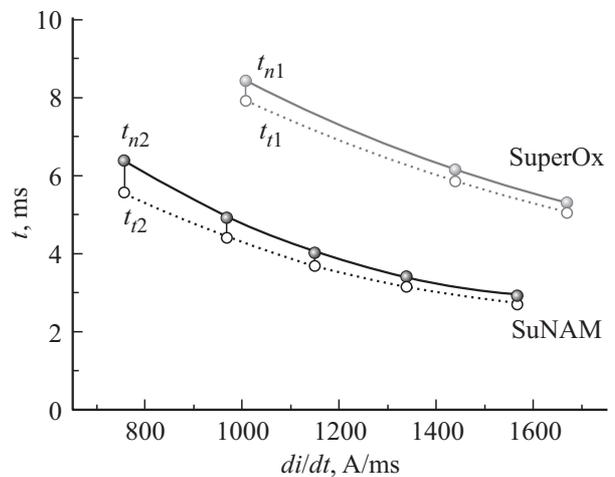
Положим, что стадия перехода начинается в момент перегиба в зависимостях  $U(t)$  и  $R(t)$ . Точку перегиба можно найти путем дифференцирования кривой  $U(t)$  и определения момента  $t_t$  максимума полученной за-

висимости  $dU/dt$ . Этот момент определим как начало переходного процесса. Мгновенные значения тока  $i_t$ , напряжения  $U_t$  и сопротивления  $R_t$  в момент  $t_t$  при разных значениях  $(di/dt)_{max}$  показаны пустыми кружками ( $\circ$ ) на рис. 2–4. При  $t \geq t_t$  рост тока прекращался и ток начинал медленно падать вследствие уменьшения степенного показателя ВАХ до единицы и увеличения сопротивления ВТСП в результате его джоулева разогрева. В отличие от Бл1 напряжение  $U_t$  в точках перегиба ВАХ в Бл2 заметно увеличивался с увеличением  $(di/dt)_{max}$  (рис. 4).

Время до начала перехода  $t_t$  и до момента  $t_n$  завершения перехода ВТСП в нормальное состояние в блоках Бл1 ( $t_{t1}, t_{n1}$ ) и Бл2 ( $t_{t2}, t_{n2}$ ) уменьшалось с увеличением скорости роста тока  $t_t \sim t_n \sim 1/(di/dt)_{max}$  (рис. 5). Для каждого  $(di/dt)_{max}$  переходная стадия в Бл1 начиналась в 2 раза позже, чем в Бл2 ( $t_{t1}/t_{t2} \approx 2$ ). Длительность переходной стадии  $t_n - t_t$  в обоих блоках



**Рис. 4.** ВАХ блоков ВТСП модулей при разных  $(di/dt)_{max}$ : Бл1: 1 — 1670, 2 — 1440, 3 — 1007, Бл2: 4 — 1570, 5 — 1340, 6 — 1150, 7 — 970, 8 — 760 A/ms.



**Рис. 5.** Зависимости моментов перехода  $t_t$  и  $t_n$  от  $(di/dt)_{max}$  в блоке Бл1 ( $t_{t1}, t_{n1}$ ) и в блоке Бл2 ( $t_{t2}, t_{n2}$ ).

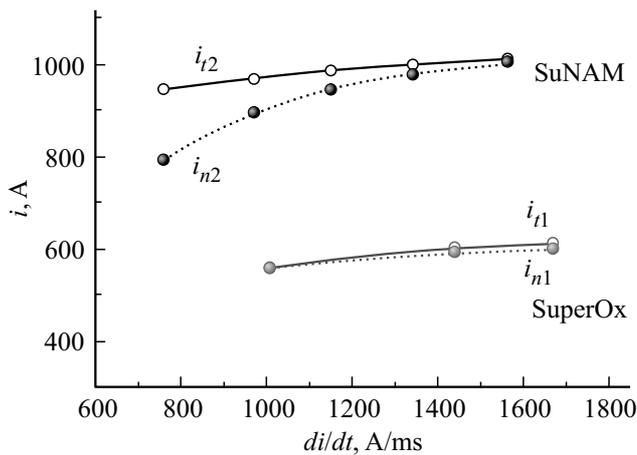


Рис. 6. Зависимости токов  $i_t$  и  $i_n$  в блоках Бл1 и Бл2 от  $(di/dt)_{\max}$ .

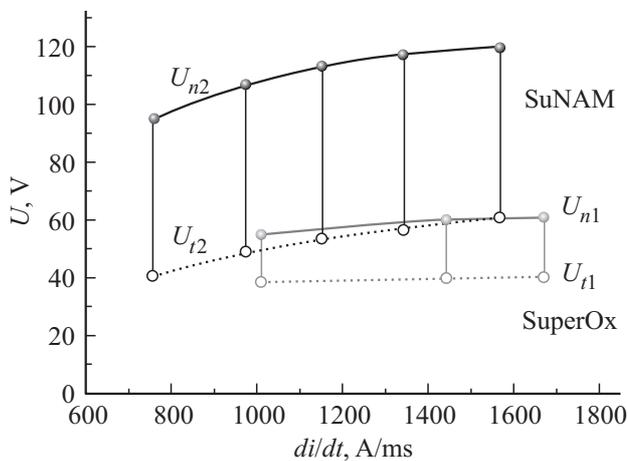


Рис. 7. Зависимости напряжений  $U_t$  и  $U_n$  на блоках Бл1 и Бл2 от  $(di/dt)_{\max}$ .

уменьшалась с увеличением  $(di/dt)_{\max}$  примерно одинаково.

На рис. 6 представлены зависимости от  $(di/dt)_{\max}$  токов перехода  $i_{t1}/m_1$  и  $i_{n1}/m_1$  ( $m_1 = 12$ ) в блоке модулей Бл1 и токов перехода  $i_{t2}/m_2$  и  $i_{n2}/m_2$  ( $m_2 = 4$ ) в блоке модулей Бл2, нормированных на одну ВТСП ленту. В блоке модулей Бл1 ток  $i_{t1}$  в 2 раза превышал критический ток  $I_{cb1}$  и мало отличался от тока  $i_{n1}$  в момент завершения перехода в нормальное состояние. С увеличением  $(di/dt)_{\max}$  в 1.5 раза ток  $i_{t1}$  увеличился на 7%. В блоке модулей Бл2 ток  $i_{t2}$  в момент начала переходной стадии в 1.35 раза превышал критический ток  $I_{cb2}$  при  $(di/dt)_{\max} = 760$  A/ms и увеличился на 7% при увеличении  $(di/dt)_{\max}$  в 2 раза. При этом ток  $i_{n2}$  в момент перехода ВТСП в нормальное состояние увеличился на 21% и приблизился к току  $i_{t2}$ .

Зависимости удельных напряжений  $U_{t1}/l_{b1}$  в момент  $t_{t1}$  и  $U_{n1}/l_{b1}$  в момент  $t_{n1}$  на блоке модулей Бл1 и удельных напряжений  $U_{t2}/l_{b2}$  в момент  $t_{t2}$  и  $U_{n2}/l_{b2}$  в момент  $t_{n2}$  на блоке модулей Бл2 представлены на рис. 7.

При увеличении  $(di/dt)_{\max}$  в 1.5 раза удельное напряжение  $U_{t1}/l_{b1} = (28-39)$  V/m в момент  $t_{t1}$  на блоке Бл1 практически не менялось, а удельное напряжение  $U_{n1}/l_{b1}$  в момент  $t_{n1}$  завершения перехода в нормальное состояние увеличилось на 10%. В блоке Бл2 при увеличении  $(di/dt)_{\max}$  в 2 раза удельное напряжение  $U_{t2}/l_{b2}$  увеличилось на 33%, а удельное напряжение  $U_{n2}/l_{b2}$  увеличилось на 20%. Интервал  $t_n - t_t$  между моментом  $t_t$  начала перехода и моментом  $t_n$  завершения перехода ВТСП в нормальное состояние уменьшался с увеличением  $(di/dt)_{\max}$  от 0.52 до 0.25 ms в блоке Бл1 и от 0.84 до 0.2 ms в блоке Бл2.

В момент отключения тока сопротивление блока ВТСП модулей Бл1 увеличивалось до 0.6  $\Omega$ , а блока ВТСП модулей Бл2 до 2.2  $\Omega$ , что соответствует нагреву ВТСП ленты до температуры порядка 200 K (рис. 2, б и 3, б).

## Заключение

Исследованы характеристики перехода блоков ВТСП модулей из сверхпроводящего в нормальное состояние при разных скоростях нарастания тока  $(di/dt)_{\max}$  до 1700 A/ms. Сверхпроводниковые блоки изготовлены из ВТСП лент разных производителей: производства компании СуперОкс (Бл1) с критическим током  $I_{c1} = 300$  A ( $I_{cb1} = 3600$  A) и компании SuNAM (Бл2) с критическим током  $I_{c2} = 700$  A ( $I_{cb1} = 2800$  A). Переходная стадия начиналась в момент  $t_t$  перегиба кривой напряжения на блоке ВТСП модулей и завершалась в момент  $t_n$  при нагреве ВТСП до критической температуры  $T_C = 93$  K.

В результате исследований установлено, что с увеличением  $(di/dt)_{\max}$

- уменьшается время от начала тока до момента  $t_t$  начала перехода ВТСП в нормальное состояние  $t_t \sim 1/(di/dt)_{\max}$ , причем момент  $t_{t1}$  в блоке Бл1 наступал в 2 раза позже, чем момент  $t_{t2}$  в блоке Бл2;

- уменьшается интервал  $t_n - t_t$  между моментом  $t_t$  начала переходной стадии и моментом  $t_n$  завершения полного перехода ВТСП в нормальное состояние, причем это уменьшение не зависело от исполнения блока ВТСП модулей;

- увеличивается ток  $i_t$  начала перехода и ток  $i_n$  завершения перехода в нормальное состояние, причем увеличение тока  $i_n$  в блоке Бл2 более заметно по сравнению с блоком Бл2, что может быть обусловлено более быстрым спадом тока на переходной стадии после достижения тока  $i_t$ ;

- увеличивается напряжение перехода  $U_{t2}$  в блоке Бл2, а в блоке Бл1 напряжение  $U_{t1}$  остается практически постоянным;

- увеличивается приращение напряжения  $U_n - U_t$  в течение переходной стадии, причем это приращение в блоке Бл2 в 2 раза превышает соответствующее приращение в блоке Бл1.

Из полученных результатов следует, что с увеличением критического тока влияние скорости нарастания тока на характеристики переходной стадии блоков ВТСП модулей становится более существенным.

Полученные зависимости следует учитывать при проектировании резистивных СОР.

## Список литературы

- [1] *De Sousa W.T.B., Polasek A., Silva F.A., Dias R., Jurelo A.R., De Andrade R.* // Jr. Simulations, Tests of MCP-BSCCO-2212 Superconducting Fault Current Limiters //IEEE Trans Appl. Superconductiv. 2012. Vol. 22. N 2.
- [2] *Degtyarenko P.N., Dul'kin I.N., Fisher L.M., Kalinov A.V., Voloshin I.F., Yampolsky V.A.* // Low Temp. Phys. 2011. Vol. 37. P. 101–106.
- [3] *Lee W.S., Nam S., Kim J., Lee J., Ko T.K.* // IEEE Trans Appl. Superconductiv. 2015. Vol. 25. N 3.
- [4] *Alferov D., Budovsky A., Dul'kin I., Fisher L., Ivanov V., Sidorov V., Shul'ga R., Tshay E., Yevsin D.* // Proc. of the IEEE/CSC and ESAS European Superconductivity News Forum ESNF. 2010. N 11. P. 1–8.
- [5] *Алферов Д.Ф., Ахметгареев М.Р., Будовский А.И., Бунин Р.А., Евсин Д.В., Иванов В.П., Сидоров В.А., Цхай Е.В.* // Электричество. 2012. № 9. С. 12–22.
- [6] *Алферов Д.Ф., Ахметгареев М.Р., Будовский А.И., Бунин Р.А., Волошин И.Ф., Дегтяренко П.Н., Евсин Д.В., Иванов В.П., Сидоров В.А., Фишер Л.М., Цхай Е.В.* // Известия АН. Энергетика. 2011. № 4. С. 30–36.
- [7] *Фишер Л.М., Алферов Д.Ф., Ахметгареев М.Р., Будовский А.И., Евсин Д.В., Волошин И.Ф., Калинов А.В.* // Ядерная физика и инжиниринг. 2015. Т. 6. № 11–12. С. 553–561.
- [8] *Алферов Д.Ф., Ахметгареев М.Р., Будовский А.И., Евсин Д.В., Фишер Л.М.* // Электро. 2015. № 3. С. 43–47.