

## ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ ТЕПЛОВЫХ И АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

### ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ ТОКОГРАНИЧИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ НА ОТКЛЮЧЕНИЕ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

© 2023 г. Д. А. Григорьев<sup>а</sup>, О. Ю. Гусев<sup>а</sup>, Ю. П. Гусев<sup>а</sup>, Н. О. Посохов<sup>а</sup>, \*

<sup>а</sup> Национальный исследовательский университет “Московский энергетический институт”,  
Красноказарменная ул., д. 14, Москва, 111250 Россия

\*e-mail: PosokhovNO@mpei.ru

Поступила в редакцию 24.01.2023 г.

После доработки 23.02.2023 г.

Принята к публикации 01.03.2023 г.

Исследовано влияние высокотемпературных сверхпроводниковых (ВТСП) токоограничивающих устройств (ТОУ) на требования к электродинамической, термической стойкости и отключающей способности высоковольтных выключателей при отключении однофазных коротких замыканий в кабельных линиях напряжением 110 кВ и дана оценка влияния ВТСП ТОУ на переходные восстанавливающиеся напряжения (ПВН). Сопоставлены расчетные и натурные осциллограммы. Установлено, что при использовании ВТСП ТОУ можно существенно снизить требования к высоковольтным выключателям по электродинамической и термической стойкости, отключающей способности, включая пиковые значения и скорости ПВН. Альтернативным способом уменьшения пиковых значений и скорости ПВН, позволяющим в ряде случаев отказаться от применения дорогостоящих ВТСП ТОУ, является использование высоковольтных выключателей, оснащенных шунтирующими резисторами, что дает возможность не увеличивать бестоковую паузу автоматического повторного включения (АПВ), обусловленную необходимостью охлаждения ВТСП ТОУ после срабатывания. Применение ВТСП ТОУ может быть оправданным на мощных электростанциях и магистральных подстанциях с уровнем токов короткого замыкания более 40 кА.

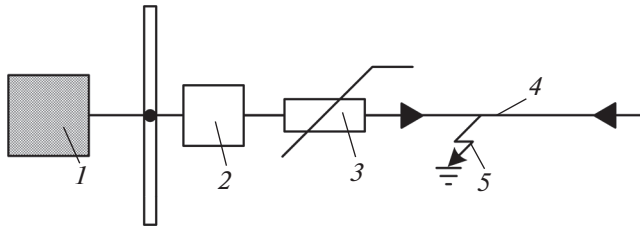
*Ключевые слова:* высокотемпературные сверхпроводниковые токоограничивающие устройства, кабельные линии, однофазные короткие замыкания, переходные восстанавливающиеся напряжения, высоковольтные выключатели, электродинамическая и термическая стойкость, отключающая способность

DOI: 10.56304/S0040363623080039

Вследствие увеличения установленной мощности генерирующего оборудования в электроэнергетических системах, главным образом на крупных атомных и тепловых электростанциях, растут токи короткого замыкания (КЗ). Увеличению токов КЗ способствует тенденция замены воздушных линий (ВЛ) кабельными линиями (КЛ) электропередачи. Для ограничения роста токов КЗ на электростанциях можно создавать распределительные устройства с более высокими напряжениями. Выдача электростанциями электрической энергии в электрические сети при повышенном напряжении, если это дополнительно не оправдано ограничениями пропускной способности линий электропередачи, может оказаться экономически нецелесообразной. В этом случае для уменьшения токов КЗ более оправданным является отказ от использования токоограничивающих устройств. Одним из возможных видов ТОУ являются высокотемпературные сверхпро-

водниковые ТОУ [1, 2]. Использование ВТСП ТОУ напряжением 220 кВ, переданного в 2019 г. в опытно-промышленную эксплуатацию в энергосистеме [Москва, подстанция 220 кВ “Мнёвники”, заказчик АО “ОЭК”], по данным компании “СуперОкс” позволяет сократить количество точек статического деления сети, снизить стоимость и вероятность повреждения электрооборудования при КЗ и продлить срок его службы, повысить пожаробезопасность и качество электроснабжения, уменьшить потери электроэнергии [1].

В высоковольтных сетях 110 и 220 кВ при токе КЗ, превысившем пороговое среднеквадратическое значение 600–3350 А, активное сопротивление ВТСП ТОУ увеличивается с 0.1 до 30–40 Ом за время не более 4 мс [2]. Пороговое значение тока зависит от свойств сверхпроводящего материала. Для срабатывания ВТСП ТОУ не требуются внешние управляющие сигналы. После перехода ТОУ из состояния ВТСП в обычное резистивное



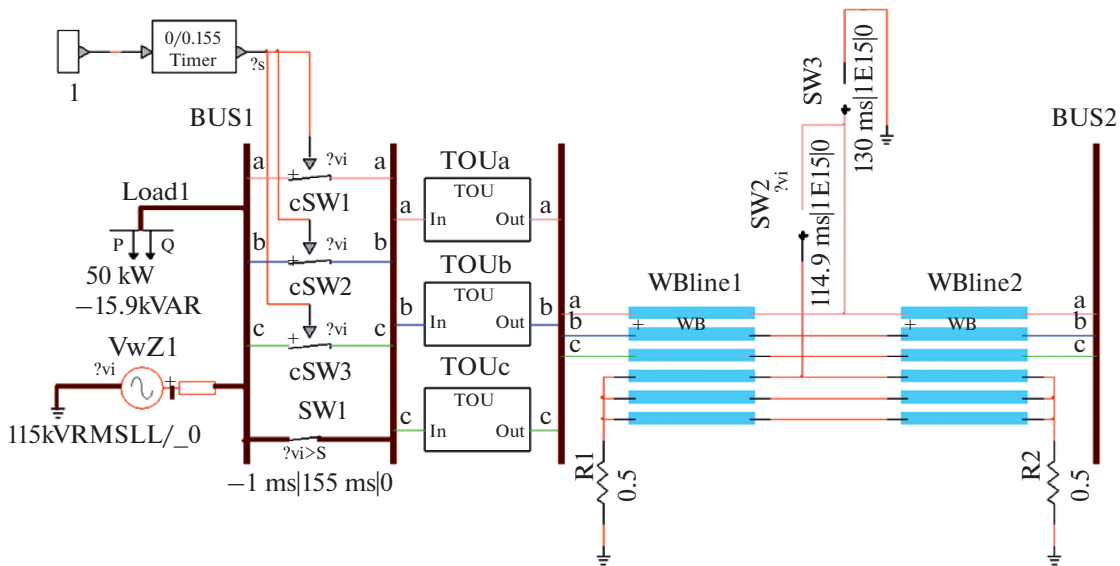
**Рис. 1.** Расчетная схема объекта исследования. 1 – трехфазный сетевой источник напряжения 115 кВ с токами однофазного и трехфазного КЗ 50 кА и постоянной времени затухания апериодической составляющей тока КЗ 54 мс; 2 – элегазовый высоковольтный выключатель с номинальным током отключения 40 кА [4]; 3 – ВТСП ТОУ с временем достижения резистивного состояния 10 Ом за 4 мс и током срабатывания 3.35 кА; 4 – КЛ длиной 15 км (кабели ПвПу2г-1х1000(гж)/185ов-64/110); 5 – место однофазного КЗ, удаленного на 5 км от сборных шин подстанции

состояние температура токоведущих элементов ТОУ начинает быстро увеличиваться [3]. Нагрев ТОУ токами КЗ обуславливает временную задержку возврата его в состояние сверхпроводимости после выхода из состояния ВТСП, что увеличивает бестоковую паузу АПВ высоковольтных выключателей (ВВ). Использование любых ТОУ, в частности ВТСП ТОУ, усложняет алгоритмы работы релейных защит и электроавтоматики высоковольтных сетей. Несмотря на перечисленные выше недостатки ВТСП ТОУ, они позволяют умень-

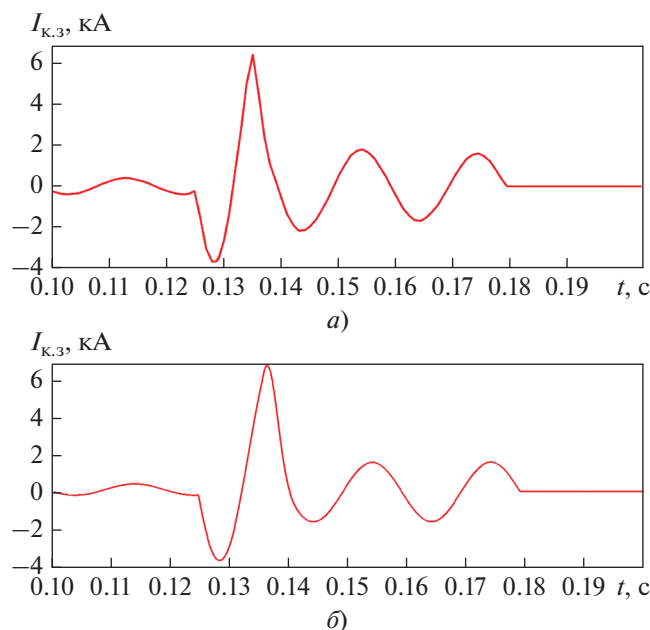
шить перенапряжения в электрической сети при отключении КЗ и снизить требования к ВВ.

В ранее опубликованных материалах исследований, посвященных ВТСП ТОУ, преимущественно рассматривались вопросы повышения быстродействия и термической стойкости таких устройств. Публикаций с результатами исследований внешних характеристик ВТСП ТОУ с оценкой их влияния на электродинамическую, термическую и отключающую способности электрооборудования в сетях напряжением 110 и 220 кВ, а также влияние ВТСП ТОУ на требования к отключающей способности ВВ, в том числе на параметры переходных восстанавливающихся напряжений (ПВН), крайне мало.

В представленной работе исследовалось влияние ВТСП ТОУ на параметры переходных процессов при отключении КЗ в сетях 110 кВ, результаты получены с помощью программы EMTP-RV (PowerSys, Франция). Исследовалось влияние ВТСП ТОУ на электродинамическую, термическую стойкость и отключающую способность выключателя КЛ в электрической сети 110 кВ и дополнительно – на параметры ПВН шунтирующих резисторов в составе высоковольтных выключателей. Расчетная схема объекта исследования показана на рис. 1. Суммарная емкость электрооборудования одной секции электрической подстанции принята равной 3.85 нФ [5] в предположении, что в распределительном устройстве 110 кВ содержится



**Рис. 2.** Схема расчетной модели. VwZ1 – трехфазный сетевой источник напряжения; Load1 – нагрузка, отражающая суммарные значения электрической емкости и активной проводимости изоляции электрооборудования подстанции относительно земли; BUS1, BUS2 – сборные шины подстанций; cSW1, cSW2, cSW3 – главные контакты элегазового высоковольтного выключателя; SW1 – дугогасительные контакты элегазового высоковольтного выключателя; SW2, SW3 – идеальные ключи, создающие однофазное короткое замыкание на кабельной линии; TOUa, TOUb, TOUc – макромодели ВТСП ТОУ; R1, R2 – активные сопротивления заземляющих устройств подстанции; WBl ine1, WBl ine2 – макромодели участков кабельной линии, учитывающие нелинейность частотной зависимости параметров схемы замещения



**Рис. 3.** Зависимость тока КЗ  $I_{к.з}$  в фазе С ВТСП ТОУ от времени  $t$ .  
*a* – натурная осциллограмма; *б* – расчетная осциллограмма

разъединители, высоковольтные выключатели, измерительные трансформаторы тока, трансформаторы напряжения, ограничители перенапряжения (ОПН), силовые трансформаторы, кабельные линии и ВТСП ТОУ. Схема расчетной модели приведена на рис. 2.

При параметризации КЛ использовали данные кабелей ПвПу2г-1×1000(гж)/185ов-64/110 из каталога. Принимали, что в модели кабели уложены треугольником без просвета в грунте при удельном сопротивлении 100 Ом на глубине 1.5 м. Экраны кабелей соединяли один с другим и заземляли с обеих сторон линии. Ключом SW2 создавалось однофазное КЗ фазы кабеля с его экраном на удалении 5 км от контактов ВВ как наиболее тяжелое расчетное условие при проверке высоковольтных выключателей по ПВН [6]. Со-

противления заземляющих устройств подстанции принимали равными 0.5 Ом в соответствии с Правилами устройства электроустановок.

Верификацию расчетной модели выполняли путем сопоставления натурной осциллограммы с подстанции “Мнёвники” с осциллограммой, полученной на расчетной модели для однофазного КЗ на КЛ 220 кВ с ВТСП ТОУ. При мгновенном значении тока в фазе С равном 6.4 кА состояние ВТСП ТОУ изменилось из сверхпроводящего на резистивное. Натурная и расчетная осциллограммы различались не более чем на 5% (рис. 3). Кроме того, расчетные осциллограммы тока КЗ (рис. 4) согласуются на качественном уровне с осциллограммами из материалов испытаний компании “СуперОкс” [2] (рис. 5).

Результаты верификации подтвердили возможность использования разработанной расчетной модели для оценки влияния ВТСП ТОУ на процесс отключения КЗ.

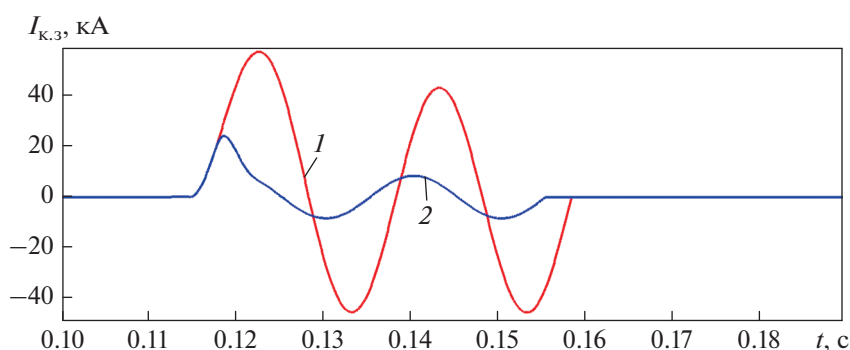
Альтернативным вариантом снижения требований к отключающей способности по параметрам ПВН является оснащение ВВ шунтирующими резисторами  $R_{ш}$ . При этом отключение цепи осуществляется после размыкания главных контактов  $K_r$  дугогасительными контактами  $K_{дг}$  ВВ [6]. Расчетная схема ВВ, оснащенного шунтирующими резисторами, показана на рис. 6. Шунтирующий резистор должен снижать пиковые значения и скорости нарастания ПВН, причем снижение это должно быть тем больше, чем меньше сопротивление шунтирующего резистора [7].

Оценка влияния ВТСП ТОУ на электродинамическую, термическую стойкость, отключающую способность и стойкость ВВ проведена путем сопоставления результатов расчета однофазного тока КЗ в следующих схемах:

без ВТСП ТОУ и без наличия шунтирующих резисторов у ВВ;

с ВВ, оснащенным шунтирующими резисторами ( $R_{ш} = 50$  Ом [7]), но без ВТСП ТОУ;

без шунтирующих резисторов у ВВ, но с использованием ВТСП ТОУ.



**Рис. 4.** Зависимость тока однофазного КЗ в фазе А от времени без учета ВТСП ТОУ (1) и с учетом ВТСП ТОУ (2)

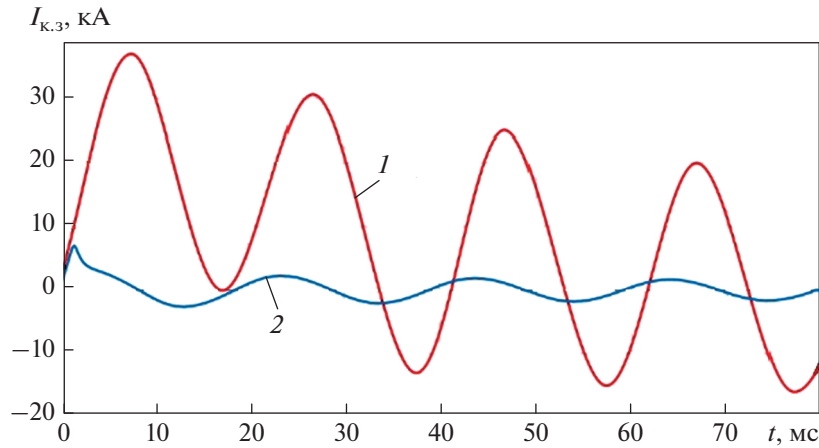


Рис. 5. Осциллограмма, полученная специалистами компании “СуперОкс” [2], тока КЗ через ВТСП ТОУ 220 кВ без учета ВТСП ТОУ (1) и с учетом ВТСП ТОУ (2)

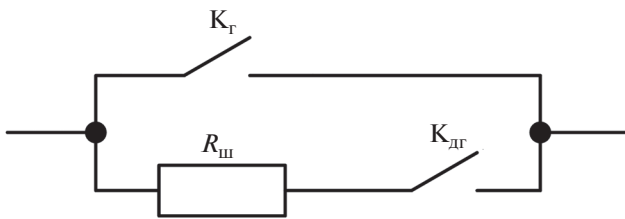


Рис. 6. Расчетная схема высоковольтного выключателя с шунтирующими резисторами

Влияние на требования к отключающей способности ВВ оценивали путем сопоставления мгновенного значения отключаемого тока КЗ в цепи на момент начала расхождения дугогасительных контактов ВВ  $t = 40$  мс в соответствии с нормативными документами [8, 9]:

$$i_t \leq i_n,$$

где  $i_t$  — мгновенное значение отключаемого тока, полученное на расчетной модели, кА;

$$i_n = \sqrt{2} I_{ном} \frac{\beta_n}{100\%}$$

— нормированное мгновенное значение отключаемого тока ВВ, кА;  $\beta_n$  — нормированное содержание

апериодической составляющей ( $\beta_n = 45\%$  [4]);  $I_{ном}$  — номинальный ток отключения ВВ, кА.

Отключающую способность определяли при условии, что расчетная кривая ПВН не выходит за пределы условной граничной линии и пересекает не более чем один раз линию запаздывания [8].

Термическую стойкость оценивали путем сопоставления расчетного значения интеграла Джоуля с термически допустимым интегралом Джоуля, исходя из следующего условия:

$$B_k \leq I_{н.т}^2 t_o, \tag{1}$$

где  $B_k$  — значение интеграла Джоуля, полученное на расчетной модели,  $A^2 \cdot c$ ;  $I_{н.т}$  — нормированное значение тока термической стойкости ВВ, А;  $t_o$  — полное время отключения КЗ, с.

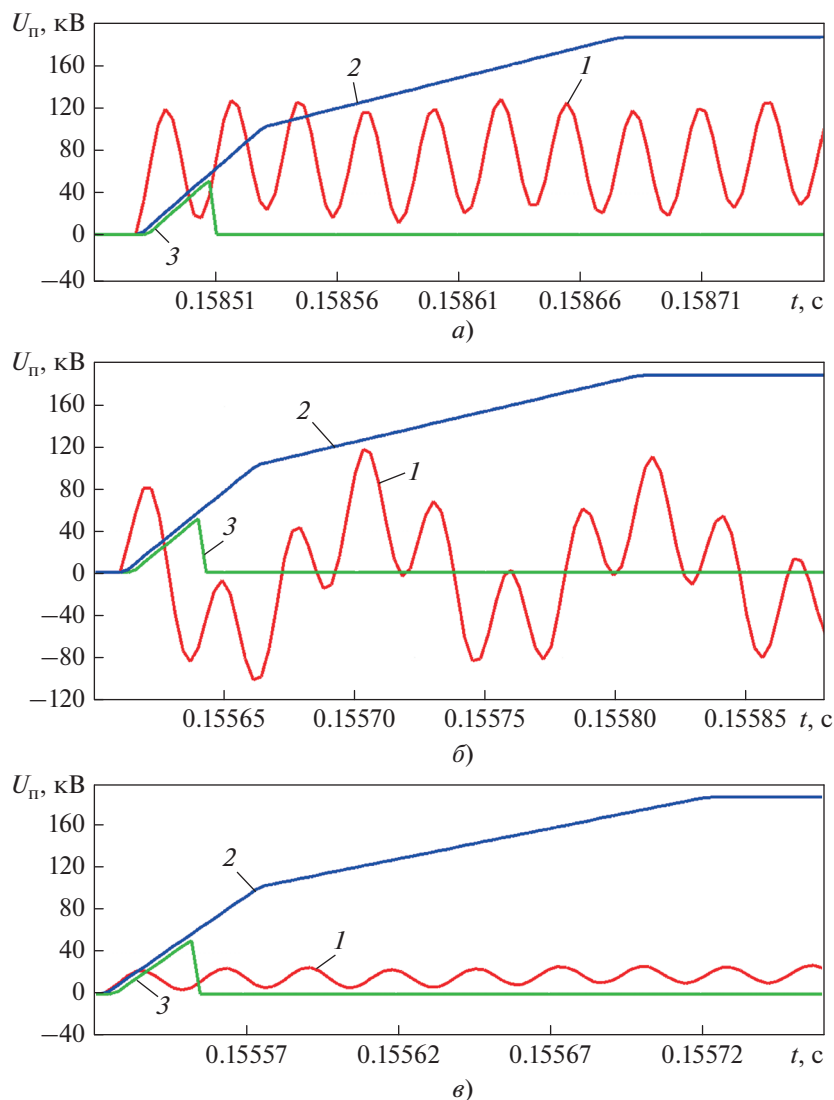
Электродинамическую стойкость оценивали путем сопоставления наибольшего мгновенного значения предельного сквозного тока КЗ с нормированным значением наибольшего пика тока электродинамической стойкости для данного ВВ в соответствии с условием (2):

$$i_m \leq i_{п.с}, \tag{2}$$

где  $i_m$  — наибольшее мгновенное значение отключаемого тока ВВ, полученное на расчетной моде-

Параметры процесса отключения тока короткого замыкания

Условие расчета	Параметр		
	$i_{п.с}$ , кА	$B_k$ , кА <sup>2</sup> ·с	$i_m$ , кА
Без ВТСП ТОУ, без шунтирующих резисторов	57.5	47.4	40.1
С шунтирующими резисторами	57.5	47.4	39.3
С ВТСП ТОУ	24.3	2.87	1.37
Нормированное значение для ВВ [5]	102.0	96.0	25.5



**Рис. 7.** Зависимость пикового значения ПВН  $U_{п}$  от времени при однофазном КЗ для расчетной схемы без ВТСП ТОУ и шунтирующих резисторов (а), с шунтирующими резисторами (б), с ВТСП ТОУ (в). 1 – напряжение; 2, 3 – нормативные ограничения скорости и пиковых значений ПВН по [8, 9]

ли, кА;  $i_{п.с}$  – номинальное наибольшее мгновенное значение предельного сквозного тока КЗ, кА.

Полученные в соответствии с вышеприведенными расчетными условиями результаты представлены на рис. 7 и в таблице.

Использование шунтирующих резисторов хотя и дает возможность снизить скорости и пиковые значения ПВН, но без ВТСП ТОУ не обеспечивает соответствие ПВН требованиям нормативных документов: скорость не более 2 кВ/мкс, пиковые значения не более 187 кВ [8].

Применяя ВТСП ТОУ, можно увеличить активное сопротивление контура с током КЗ раньше (со 118-й миллисекунды), чем начинают размыкаться дугогасящие контакты ВВ (со 155 миллисекунды), что позволяет уменьшить сдвиг по

фазе между напряжением и током КЗ, увеличить декремент затухания контура и, как следствие, снизить скорость и пиковые значения ПВН и обеспечить соответствие ПВН требованиям нормативных документов. Для исследуемого объекта благодаря установке ВТСП ТОУ удалось снизить параметры переходных процессов при КЗ, используемые для проверки ВВ по отключающей способности в 29 раз, по термической стойкости в 17 раз, электродинамической стойкости в 2.4 раза, при этом скорость нарастания ПВН уменьшилась в 13 раз, пиковые значения ПВН – в 1.4 раза.

Оснащение ВВ шунтирующими резисторами помогает уменьшить скорость нарастания ПВН в 1.6 раза, а пиковые значения ПВН – в 1.4 раза, что может быть достаточным для небольших значений токов КЗ.

## ВЫВОДЫ

1. Использование ВТСП ТОО позволяет существенно снизить требования к ВВ по электродинамической и термической стойкости, отключающей способности, включая пиковые значения и скорости ПВН.

2. Применение высоковольтных выключателей, оснащенных шунтирующими резисторами, дает возможность уменьшить пиковые значения и скорости ПВН в меньшей степени, чем с ВТСП ТОО, и при этом не приводит к побочным эффектам, связанным с увеличением бестоковой паузы АПВ и необходимостью усложнять алгоритмы работы релейных защит.

3. Целесообразность использования ВТСП ТОО на мощных электростанциях и магистральных подстанциях должна рассматриваться после подтверждения неэффективности применения ВВ с шунтирующими резисторами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ЗАО “СуперОкс”. [Электрон. ресурс] Режим доступа: <https://www.superox.ru/upload/iblock/cd8/cd8aa8c055fa33dab8e4af86926b0e2c.pdf> (Дата обращения: 21.01.2023).
2. **Deployment** of a resistive superconducting fault current limiter for improvement of voltage quality and transient recovery voltage / W.T.V. de Sousa, D. Kottonau, S. Karrari, J. Geisbüsch, M. Noe // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2021. V. 31. No. 1. P. 1–9. <https://doi.org/10.1109/TASC.2020.3016460>
3. **Мальгинов В.А., Мальгинов А.В., Флейшман Л.С.** Применение стабильного перегруженного режима в высокотемпературных сверхпроводниковых защитных резисторах // ЖТФ. 2019. Т. 89. № 12. С. 1853–1861.
4. **Методические** указания по ограничению высокочастотных коммутационных перенапряжений и защите от них электротехнического оборудования в распределительных устройствах 110 кВ и выше. М.: СПО ОРГРЭС, 1998.
5. **АО** высоковольтного оборудования “Электроаппарат”. [Электрон. ресурс.] Режим доступа: <https://elektroapparat.ru/products/vyklyuchateli/vgp-110/> (Дата обращения: 21.01.2023).
6. **Перенапряжения** в электрических системах и защита от них / В.В. Базуткин, К.П. Кадомская, М.В. Костенко, Ю.А. Михайлов. СПб.: Энергоатомиздат, 1995.
7. **Акодис М.М., Корзун П.А.** Определение восстанавливаемых напряжений на контактах выключателя. М.: Энергия, 1968.
8. **ГОСТ Р 52565-2006.** Выключатели переменного тока на напряжения от 3 до 750 кВ. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2006.
9. **СТО 56947007-29.130.10.095-2011.** Выключатели переменного тока на напряжение от 3 до 1150 кВ. М.: ФСК ЕЭС, 2011.

## The Effect of High-Temperature Superconducting Current Limiters on Short-Circuit Fault Clearing

D. A. Grigor'ev<sup>a</sup>, O. Yu. Gusev<sup>a</sup>, Yu. P. Gusev<sup>a</sup>, and N. O. Posokhov<sup>a</sup>, \*

<sup>a</sup> National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow, 111250 Russia

\*e-mail: PosokhovNO@mpei.ru

**Abstract**—The article considers the influence of high-temperature superconducting (HTS) current limiters (CLs) on the requirements for peak withstand current, short-term withstand current, and breaking capacity of high-voltage circuit breakers in clearing single-phase short-circuit faults in 110-kV cable lines and estimates the influence of HTS CLs on transient recovery voltages (TRVs). Predicted and field oscillograms are compared with each other. In the case of using HTS CLs, it becomes possible to considerably reduce the requirements for high-voltage circuit breakers in terms of peak and short-term withstand current and breaking capacity, including the TRV peak and rate-of-change values. An alternative way for reducing the TRV peak and rate-of-change values, which makes it possible in many cases to do without expensive HTS CLs, is to use high-voltage circuit breakers fitted with shunt resistors. With such a solution, it becomes possible to not increase the automatic reclosing dead time caused by the need to cool the HTS CL after its actuation. The use of HTS CLs may be justified at high-capacity power plants and trunk substations with the level of short-circuit currents higher than 40 kA.

**Keywords:** high-temperature superconducting current limiters, cable lines, single-phase short-circuit faults, transient recovery voltages, high-voltage circuit breakers, peak withstand current, short-term withstand current, breaking capacity