

**Некоммерческое партнерство  
«НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СОВЕТ  
Единой энергетической системы»**  
109044, Россия, Воронцовский пер., 2, стр.1  
Тел. (495) 912-10-78, 912-57-99, факс. 632-72-85  
[www.nts-ees.ru](http://www.nts-ees.ru)

## **ОТЧЕТ**

**заседания секции «Развитие, эксплуатация и техническое  
перевооружение электрических сетей» НП «НТС ЕЭС»**

по теме:

**«Технические требования к сверхпроводниковому  
ограничителю токов КЗ для электрических сетей  
напряжением 110 – 220 кВ»**

Москва, 2009 г.

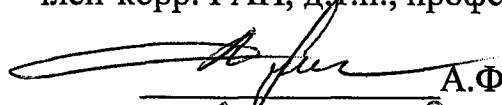


**Некоммерческое партнерство  
«НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СОВЕТ  
Единой энергетической системы»**

109044 г. Москва, Воронцовский пер., дом 2  
Тел. (495) 912-1078, 912-5799, факс (495) 632-7285  
E-mail: [dtv@nts-ees.ru](mailto:dtv@nts-ees.ru), <http://www.nts-ees.ru/>  
ИНН 7717150757

### УТВЕРЖДАЮ

Председатель Научно-технической  
коллегии НП «НТС ЕЭС»,  
член-корр. РАН, д.т.н., профессор

  
А.Ф. Дьяков  
«26» июня 2009 г.

### ПРОТОКОЛ

Совместного заседания коллегий «Электротехническое оборудование»,  
«Развитие, эксплуатация и техническое перевооружение» и Научно-  
технического совета ОАО «НТЦ» электроэнергетики» по теме:  
«Технические требования к сверхпроводниковому ограничителю токов КЗ  
для электрических сетей напряжением 110-220 кВ».

18 июня 2009 года.

№

г. Москва

Присутствовали:

Всего: 37 чел., в том числе:

По коллегии «Электротехническое оборудование»: 13 чел.

По коллегии «Развитие, эксплуатация и техническое перевооружение»: 14 чел.

От Научно-технического совета ОАО «НТЦ» электроэнергетики»: 10 чел.

На заседании выступили:

**С вступительным словом:** Начальник департамента систем передачи  
и преобразования электроэнергии ОАО «ФСК ЕЭС» Ю.А Дементьев и  
заместитель генерального директора-научный руководитель ОАО «НТЦ  
электроэнергетики» Ю.Г. Шакарян

**По вопросу повестки дня** выступили: с докладом начальник отдела  
ОАО «НТЦ электроэнергетики» А. Ю. Коваленко. (Материалы прилагаются)

В обсуждении приняли участие: Л.С. Флейшман (ОАО «ЭНИН им. Г.М.Кржижановского»), Д.Р. Любарский, В.Н. Подъячев (ОАО «Институт Энергосетьпроект»), Ю.Г. Шакарян (ОАО «НТЦ электроэнергетики»), Ю.А. Дементьев (ОАО «ФСК ЕЭС»).

Заслушав и обсудив доклад и выступления в дискуссии, **отмечается:**

В работе разработаны общие технические требования к сверхпроводниковым ограничителям токов (СОТ), не «привязанные» к конкретным объектам (областям применения). В дальнейшем эти технические требования должны быть дополнены требованиями, вытекающими из специфики объекта.

СОТ в электрических сетях можно применять для соединения шин на подстанциях, при вводе новых генераторов, при распределении электроэнергии с шин генераторного напряжения, в линиях электропередачи в сверхпроводниковых кабельных линиях.

СОТ являются новым устройством. При этом ряд параметров, а, в конечном итоге, и требований зависят от места их установки СОТ в сеть. Данное обстоятельство указывает на необходимость дальнейшей проработки технических требований к СОТ на основе реализации пилотных проектов. Если использовать опыт создания токоограничителя SuperLimiter™ компании American Superconductor (AMSC), то ряд требований, а именно, значение тока КЗ с токоограничителем выбирает заказчик, что влияет на конечную цену изделия.

Эффективность применения СОТ заключается в:

- отказе от секционирования электрических сетей 110 – 220 кВ и повышении надежности электроснабжения потребителей.
- повышении надежности эксплуатации и сроков службы коммутационного оборудования.
- сохранении на станциях и подстанциях существующего коммутационного оборудования при введении новых мощностей или подключении новых линий.
- упрощении и удешевлении коммутационного оборудования на вновь строящихся объектах.
- снижении электродинамических и тепловых воздействий на оборудование за счет ограничения ударного и установившихся значениях токов КЗ.

К сверхпроводящему материалу для высоковольтного СОТ предъявляются следующие основные требования: сверхпроводник должен обладать максимальным удельным сопротивлением и максимальной плотностью тока.

Наиболее перспективными на напряжение 110/220 кВ, как показывает мировой опыт являются резистивный или трансформаторный варианты сверхпроводящих токоограничителей.

Основными техническими требованиями к СОТ 110÷220 кВ являются:

- значения установившегося тока в режиме короткого замыкания с токоограничителем,
- коэффициент степени токоограничения,
- предельные значения сквозного тока через ограничитель,

- время срабатывания СП токоограничителя,
- время восстановления,
- потери СОТ в номинальном режиме.

**Постановили:**

1. Выполненную работу считать завершенной.
2. При окончательном редактировании учесть замечания высказанные в ходе обсуждения на заседании. Срок: 30 июня 2009 года.

Заместитель Председателя  
научно-технической коллегии  
НП «НТС ЕЭС»,


д.т.н.

  
В.В. Молодюк

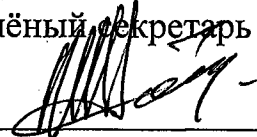
Учёный секретарь научно-технической  
коллегии НП «НТС ЕЭС», к.т.н.

  
Я.Ш. Исамухамедов


Председатель коллегии «Развитие  
эксплуатация и техническое  
перевооружение электрических сетей  
НП «НТС ЕЭС», к.т.н.

  
М.Г. Линт

Учёный секретарь коллегии, д.т.н.

  
В.И. Кочкин

Председатель коллегии «Электро-  
техническое оборудование» и  
НТС ОАО «НТЦ электроэнергети-  
ки», д.т.н.

  
Ю.Г. Шакарян

Ученый секретарь коллегии, к.т.н.

  
О.Л. Магдасиев

## Технические требования и параметры токоограничителя (описание – часть отчета)

СП токоограничители являются новым устройством. Для разработки технических требований к СП токоограничителю необходимо разработать систему параметров, на основании которых строятся технические требования к СОТ. Однако необходимо учитывать, что ряд параметров, а, в конечном итоге, и требований зависят от места установки СОТ в сеть. Данное обстоятельство указывает на необходимость дальнейшей проработки технических требований к СОТ на основе реализации пилотных проектов. Если использовать опыт создания токоограничителя SuperLimiter™ компания American Superconductor (AMSC), то ряд требований, а именно, установившийся ток КЗ с токоограничителем выбирает заказчик, что является вполне логичным, но, безусловно, влияет на конечную цену изделия.

К параметрам самого СП токоограничителя (параметры сведены в таблицу 3.7), которые определяют конструкцию и количество СП материала, и, в конечном счете, стоимость устройства, относятся:

- номинальное напряжение;
- номинальный ток;
- установившийся ожидаемый ток кз (без токоограничителя). СОТ должен ставиться в сеть там, где выключатели по своим техническим характеристикам не могут отключать токи КЗ. На сегодняшний момент нет выключателей рассчитанных на токи отключения выше 60 кА, в то время как в мегаполисах (Москва, Санкт-Петербург) есть места, где в случае соединения подстанций или увеличения мощности генерации, включенной на параллельную нагрузку, ожидаемый ток КЗ может достигать и даже превосходить 100 кА;
- установившийся ток в режиме кз с токоограничителем -  $I_{\text{cot}}$ . На основании  $I_{\text{cot}}$  определяется расчетный тепловой импульс токоограничителя (термическая устойчивость).  $I_{\text{cot}}^2 \cdot t_{\text{кз}}$ ,  $\text{А}^2\text{с}$ . Расчетный тепловой импульс определяется из условия, что  $I_{\text{cot}}^2 \cdot t_{\text{кз}} \geq I_{\infty}^2 \cdot t_{\phi}$ , где  $I_{\infty}$  – установившийся ток, при КЗ за токоограничителем,  $t_{\phi}$  – фиктивное время действия тока КЗ.;

– предельный сквозной ток через ограничитель (электродинамическая устойчивость). Ток при протекании, которого в токоограничителе не наблюдается какой-либо остаточной деформации.  $i_{пр с} \geq i_{ударный}$

– начальная мгновенная величина тока КЗ ( $i_{уст}$  - ток уставки) в СП токоограничителе, при котором он переходит в состояние токоограничения – ток реагирования (ток уставки);

– время срабатывания СП токоограничителя (время с момента достижения током кз уставки ( $i_{уст}$ ) до начала токоограничивающего действия;

–  $t_{кз}$  – время существования КЗ (время работы токоограничителя от срабатывания (начала кз) до момента отключения выключателем)

– время, необходимое СП токоограничителю для восстановления своих номинальных свойств, характеризующих его работу при завершении КЗ, после отключения выключателя – время восстановления;

– токи утечки через ограничитель в номинальном режиме;

– сопротивление изоляции токоограничителя;

– срок службы при числе срабатываний не менее 100 раз в год.

Таблица 3.7 Параметры СП токоограничителей

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение/ выражение
1	Номинальное напряжение сети	$U_{ном}$
2	Номинальный ток	$I_{ном}$
3	установившийся ожидаемый ток кз без токоограничителя (действующее значение)	$I_{кз}$
4	установившийся ток в режиме кз с токоограничителем	$I_{сот}$
5	предельный сквозной ток через ограничитель	$i_{пр с}$
6	ток реагирования (ток уставки)	$i_{уст}$

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение/ выражение
7	Время срабатывания СП токоограничителя	$t_0$
8	время существования КЗ	$t_{кз}$
9	Время восстановления	$t_{восст}$
10	Токи утечки СОТ в номинальном режиме	$< 10$ пКл
11	Сопротивление изоляции токоограничителя	$\geq 200$ МОм
12	Срок службы при числе срабатываний не менее 100 раз/год	$T_{сл}$

Показатели работы СП токоограничителя в сети можно охарактеризовать следующими параметрами, которые сведены в таблицу 3.8:

- сопротивление СП токоограничителя в номинальном режиме (влияет на величину потерь без кз). Сопротивление СОТ при его работе в номинальном режиме не должно по модулю превышать 10% сопротивления короткого замыкания сети в месте присоединения СОТ. При этом потери в номинальном режиме не должны превышать 1,5% от проходной мощности СОТ.

- мощность собственных нужд СОТ при его работе в номинальном режиме не должна превышать 0,1% от его проходной мощности, вычисляемой как  $\sqrt{3}U_{ном}I_{ном}$ , если мощность собственных нужд СОТ совместно с потерями в номинальном режиме превышает 5%, то с учетом эксплуатационных затрат дешевле поставить бетонный реактор;

- сопротивление СП токоограничителя в режиме кз. КЗ является переходным процессом, сопротивление в СОТ при КЗ не может меняться мгновенно, поэтому этот параметр важен, прежде всего, при моделировании КЗ с установленным в сеть СОТ;

– коэффициент токоограничения, показывающий во сколько раз снижается ток КЗ при применении токоограничителя:

$$K_T = \frac{I_{com}}{I_{K3}} \cdot 100\%$$

Кроме того, влияние СП токоограничителя, являющегося нелинейным элементом, на качество напряжения на шинах потребителей должно быть в пределах, определенных в [Ошибка! Источник ссылки не найден.] и характеризоваться коэффициентом искажения синусоидальности кривой линейного напряжения в месте подключения.

Таблица 3.8 Показатели влияния СП токоограничителя на процессы в электрической сети

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение/ выражение
1	сопротивление СП токоограничителя в номинальном режиме	$Z_{ном}$
2	сопротивление СП токоограничителя в режиме ограничения тока кз	$Z_{СП}$
3	Коэффициент токоограничения	$K_T$
4	Коэффициент искажения синусоидальности кривой линейного напряжения в месте подключения СП токоограничителя:	
	- в нормальном режиме	$K_u$
	- в режиме токоограничения	$K_{um}$

Так как одной из функций СП токоограничителей является снижение требований к динамической стойкости электрооборудования электрических сетей и ПС, его токоограничивающее действие должно проявляться уже на первом полупериоде тока КЗ. Поэтому не зависимо от места установки СП токоограничителя желательно снижение до нуля времени реагирования устройства. Время восстановления сверхпроводниковых свойств СП



токоограничителя, соответствующих нормальному режиму работы сети после отключения КЗ, должно быть минимальным. В зависимости от типа СП токоограничителя время восстановления его сверхпроводящих свойств может быть в пределах от миллисекунд секунд до секунд [Ошибка! Источник ссылки не найден.], но в обязательном порядке должно соответствовать условиям по АПВ (автоматике повторного включения).

Технические требования к СОР 110-220 кВ приведены в приложении (Ошибка! Источник ссылки не найден.). Наиболее важные технические требования сведены в таблицу 3.9.

Таблица 3.9 Наиболее важные технические требования к СОР 110-220 кВ

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение/выражение
1	Номинальное напряжение сети	110/220 кВ
2	Номинальный ток	1÷2кА
3	токи утечки через ограничитель в номинальном режиме	< 10 пКл
4	установившийся ожидаемый ток кз без токоограничителя (действующее значение)	>60 кА
5	установившийся ток в режиме кз с токоограничителем	не более 31,5кА
6	Коэффициент токоограничения	не менее 50%
7	предельный сквозной ток через ограничитель	не более 63кА
8	ток reagирования (ток уставки)	6÷12 кА
9	время срабатывания СП токоограничителя	< 5 мс
10	время существования КЗ	120 мс
11	Время восстановления	< 2 с
12	Суммарные потери СОР в номинальном режиме не должны превышать 1,5% от проходной мощности СОР	< 1,5 %
13	Выдерживаемое время перегрузки по току, равному	6 часов

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение/ выражение
	номинальному току плюс 30%	
14	Электрическое сопротивление изоляции СОТ	$\geq 200$ МОм
15	Срок службы при числе срабатываний не менее 100 раз/год	30 лет

### **Выводы**

Наиболее перспективными на напряжение 110/220 кВ, являются резистивный или трансформаторный варианты сверхпроводящих токоограничителей.

Резюмируя вышеизложенное, можно сформулировать следующие требования к сверхпроводящему материалу для высоковольтного СОТ резистивного типа: это сверхпроводник с максимальным удельным сопротивлением и максимальной инженерной плотностью тока. В полной мере этому требованию отвечают сверхпроводники 2-го поколения и тонкие пленки. Однако последние, практически не представлены на рынке и стоимость их достаточно высока.