

М.П. БАДЁР, В.В. ЛОБЫНЦЕВ (МИИТ)

Кафедра Энергоснабжение электрических железных дорог, Московский государственный университет путей сообщения, ул. Образцова 9, стр. 9, Москва, Российская Федерация, 127994, тел.: (495) 684-22-87, эл. почта: [badjor@mail.ru](mailto:badjor@mail.ru)

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОСВОЕНИЕ В ТЯГОВОМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИИ ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ ТОКА НА ОСНОВЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ

### Введение

В настоящее время становятся наиболее актуальными научные исследования по разработке, испытаниям моделей и промышленных образцов разнообразного электротехнического оборудования на базе высокотемпературных (азотного уровня температур 77К) сверхпроводниковых материалов, включающего кабельные линии электропередачи, трансформаторы, электродвигатели, реакторы, накопители энергии.

Использование и освоение сверхпроводниковых технологий и нового высокотемпературного сверхпроводникового электротехнического оборудования в локомотивной и стационарной энергетике позволит на принципиально новом уровне решить вопросы повышения надежности и эффективности тягового электроснабжения, снижения капитальных и эксплуатационных затрат, экономии электроэнергии [1-3].

### Цель работы

Использование сверхпроводниковых электротехнических устройств, лишенных активных (резистивных) потерь энергии, в транспортной энергетике позволит создать наиболее эффективные энергосберегающие системы тягового электроснабжения (СТЭ) переменного и постоянного тока.

### Применение сверхпроводниковых ограничителей токов короткого замыкания в тяговых сетях постоянного тока

В тяговых сетях постоянного тока возможны несколько вариантов установки сверхпроводниковых ограничителей токов (СОТ) в силовую цепь ТП: на каждый фидер контактной сети; в цепь плюс шины каждого преобразовательного агрегата в отдельности; в цепь плюс шины дополнительно объединяющей оба преобразовательных агрегата.

Имитационное моделирование токоограничивающего действия СОТ проводилось приме-

нительно к ТП на участке с интенсивным пригородным движением и имеющей фидер питания депо. СОТ устанавливался в стандартные размеры ячеек фидеров тяговой сети при компоновке СОТ+1×ВАБ-49. Для полноты картины токоограничивающего действия рассмотрены: случай компоновки СОТ+2×ВАБ-49 и типовые решения – 1×ВАБ-49 и 2×ВАБ-49.

В компьютерной программе, основу которой составила общая математическая модель работы ВТСП токоограничителя резистивного типа было принято, что при равных уставках –  $I_y$ , СОТ всегда будет вступать в работу первым, так как его собственное –  $t_{СОТ\ соб}$  составляет порядка 1 и менее мс даже при наличии системы принудительного перевода в нормальное состояние (СППНС), а у выключателя –  $t_{В\ соб}$  в среднем 5-6мс. Расчётное время в случае глухого к.з. при отказе фидерного выключателя выбрано в 150мс. Это время равнозначно времени отключения быстродействующего выключателя на стороне переменного тока преобразовательного агрегата, как в случае использования системы УРОВ (устройства резервирования отключения выключателей), так и без неё.

На схемах замещения представлены подвергавшиеся моделированию случаи глухого к.з. вблизи шин ТП: при нормальном отключении выключателем одинарным и сдвоенным (1×ВАБ-49, 2×ВАБ-49), (рисунок 1); при нормальном отключении выключателем одинарным и сдвоенным совместно с СОТ (1×ВАБ-49+СОТ, 2×ВАБ-49+СОТ), (рисунок 2); при отказе фидерного выключателя и отсутствии СОТ (рисунок 3); при отказе фидерного выключателя и наличии СОТ (рисунок 4).

На схемах замещения по рисункам 1 - 4 приняты следующие обозначения элементов:

$U_{xx}$  – напряжение холостого хода на шинах источника питания (ТП);

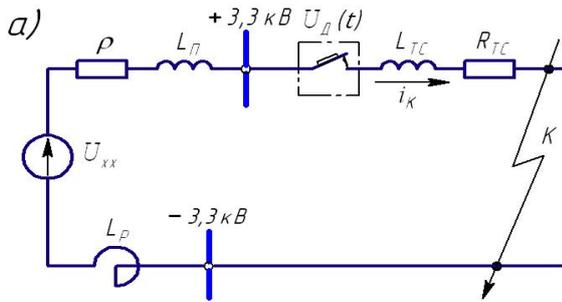


Рис. 1. Схема замещения для случая глухого к.з. при нормальном отключении выключателем одинарным и двояным (1×ВАБ-49, 2×ВАБ-49)

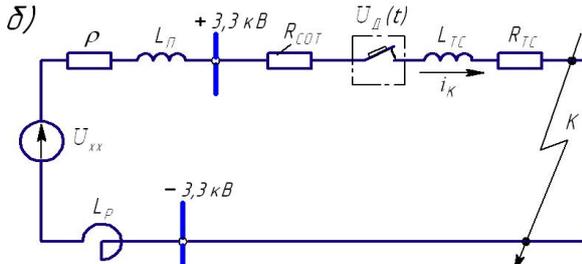


Рис. 2. Схема замещения для случая глухого к.з. при нормальном отключении выключателем одинарным и двояным совместно с СОТ (1×ВАБ-49+СОТ, 2×ВАБ-49+СОТ)

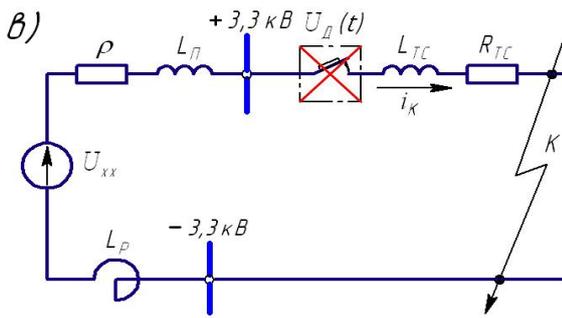


Рис. 3. Схема замещения для случая глухого к.з. при отказе фидерного выключателя и отсутствии СОТ

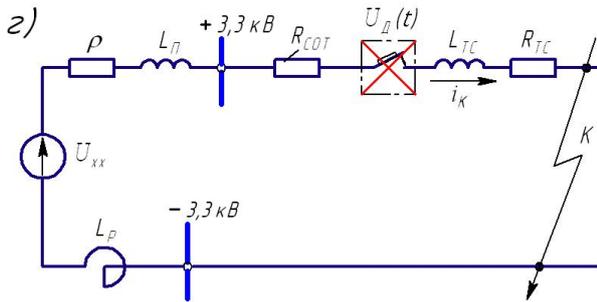


Рис. 4. Схема замещения для случая глухого к.з. при отказе фидерного выключателя и наличии СОТ

$\rho, L_P$  – эквивалентное сопротивление и индуктивность ТП, определяемые параметрами первичной питающей системы, мощностью и числом понижающих и преобразовательных трансформаторов;

$R_{TC}, L_{TC}$  – удельное сопротивление и индуктивность тяговой сети (суммарные значения последовательно соединенных и индуктивно связанных контактной и рельсовой сетей);

$L_P$  – индуктивность реактора фильтра устройства ТП;

$U_d(t)$  – напряжение на дуге выключателя в функции времени;

$R_{COT}$  – первоначально вводимое в цепь протекания тока сопротивление;

$K$  – место короткого замыкания.

Все элементы схем считаются линейными, в том числе и напряжение  $U_d(t)$  на дуге выключателя с деионной решеткой, за исключением  $R_{COT}$ , для которого будет приведена только первоначально вводимая им в цепь протекания тока величина сопротивления. Параметры схемы замещения для ТП “Ожерелье” представлены в таблице П1.

Первоначально проведем сравнение показателей работы фидерных выключателей 1×ВАБ-49 и 2×ВАБ-49. Это сравнение покажет не только достигаемый эффект от использования второго выключателя, но и ляжет в основу анализа совместной работы: СОТ+1×ВАБ-49, СОТ+2×ВАБ-49. Графические изображения временных зависимостей, полученных по результатам имитационного моделирования для ТП представлены на рисунке 5, где приняты обозначения: 1 – отключаемый ток к.з., 2 – напряжение на дуге выключателя, 3 – перенапряжение на индуктивности цепи, 4 – падение напряжения на активном сопротивлении СОТ, вводимом в цепь; а – (—) 1×ВАБ-49, (- - -) 2×ВАБ-49; б – (—) 1×ВАБ-49+СОТ, (- - -) 2×ВАБ-49; в – (—) 2×ВАБ-49+СОТ, (- - -) 2×ВАБ-49; г – (—) 1×ВАБ-49+СОТ, (- - -) 2×ВАБ-49+СОТ.

Анализ временных зависимостей проводился по характерным точкам (рисунки 6, 7), где приняты обозначения:

$t_0$  – время возникновения к.з.;

$t_1$  – время достижения током к.з. значения уставки и начала работы СОТ;

$t_1 - t_2$  – собственное время выключателя или СОТ;

$t_2$  – время начала расхождения контактов (появления на них дуги);

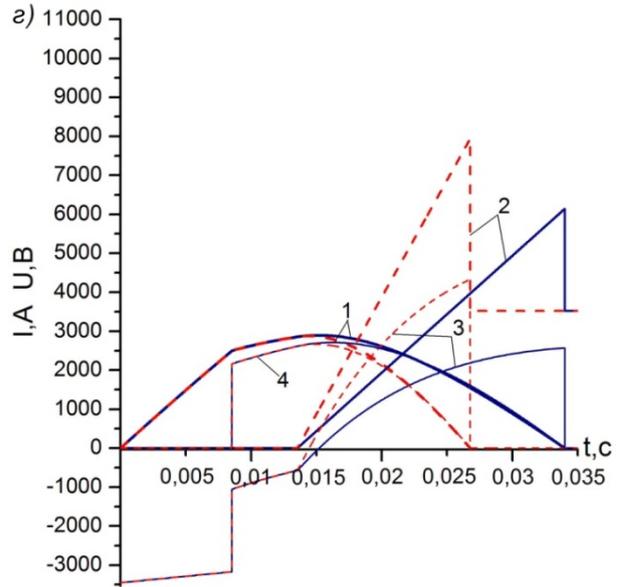
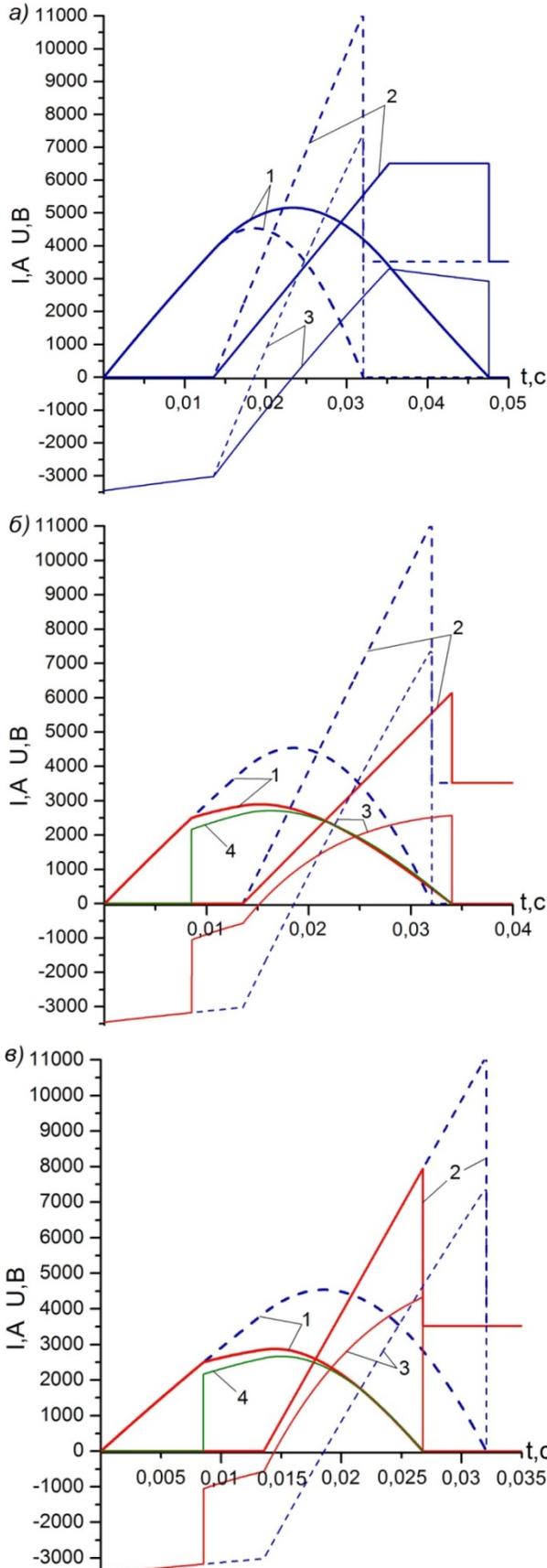


Рис. 5. Временные зависимости процессов отключения близких токов к.з. (для СОР использовалась СППНС, приводимая в действие по сигналу от ЦЗАФ-3,3)

$t_2 - t_3$  – время подъёма напряжения на дуге в камере выключателя;

$I_{к.з.о. \max}$  – максимальное значение ограниченного тока к.з.;

$U_{Лц. \max}$  – максимальное значение перенапряжения на индуктивности отключаемой цепи;

$A_{\text{кам}}$  – энергия, выделяемая в камере быстродействующего выключателя;

$A \cdot \text{сек}$  – амперсекунды отключаемого тока к.з.

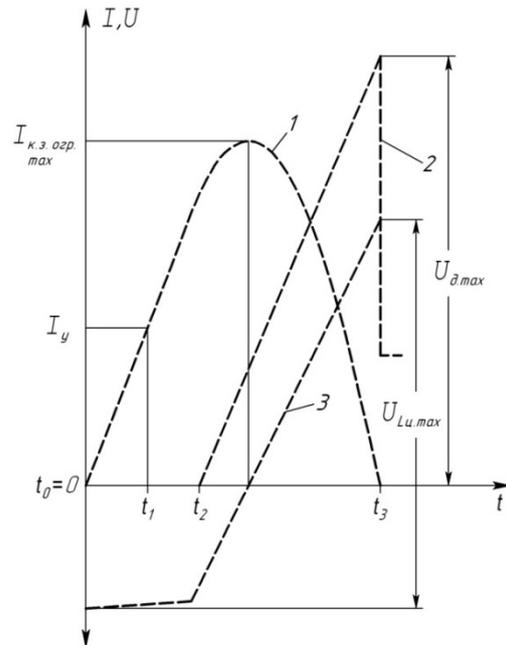


Рис. 6. Характерные точки и значения физических величин при отключении тока к.з. автоматическим быстродействующим выключателем

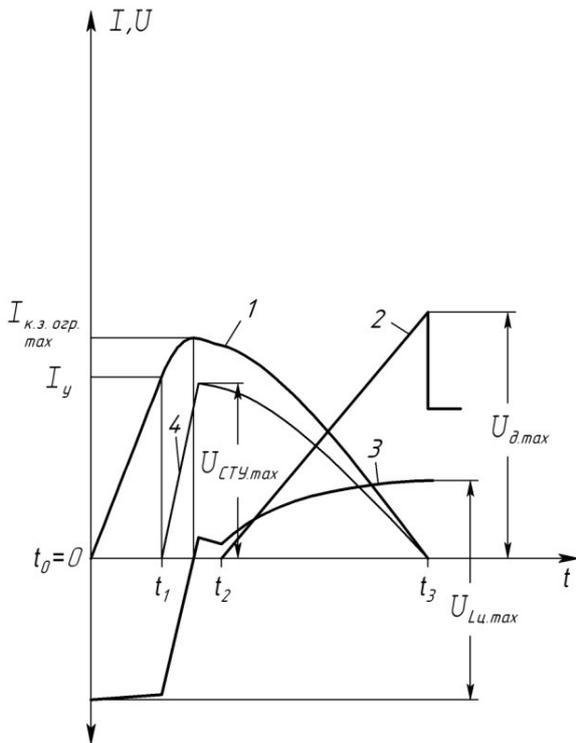


Рис. 7. Характерные точки и значения физических величин при отключении тока к.з. автоматическим быстродействующим выключателем совместно с СОТ; числовые обозначения соответствуют рисунку 2

Результаты имитационного моделирования показали, что одинарный выключатель при совместной работе с СОТ успешно справляется с отключением близких к.з. за 20,48 вместо 18,52мс при использовании типового решения 2×ВАБ-49. Время отключения увеличивается почти на 2мс, вместе с тем величина ограниченного тока к.з. снижается с 4536 до 2894А (рисунок 5, б), уменьшается уровень перенапряжений на индуктивности цепи к.з. с 11 до 6кВ, амперсекунды отключаемого тока к.з. с 78 до 52, а также энергия выделяемая в камере быстродействующего выключателя со 139 до 86кДж.

Наилучшие результаты по времени отключения тока к.з. – 13,24мс достигаются совместной работой СОТ и сдвоенного выключателя (рисунок 5, в), но при этом более глубокого токоограничивающего действия при прочих равных условиях не наблюдается (рисунок 5, г). В связи с чем, использование такой схемы включения СОТ технически и, тем более, экономически нецелесообразно.

Для полной характеристики токоограничивающего действия СОТ необходимо рассмотреть наиболее тяжелый случай – отказ фидерного выключателя (рисунок 5).

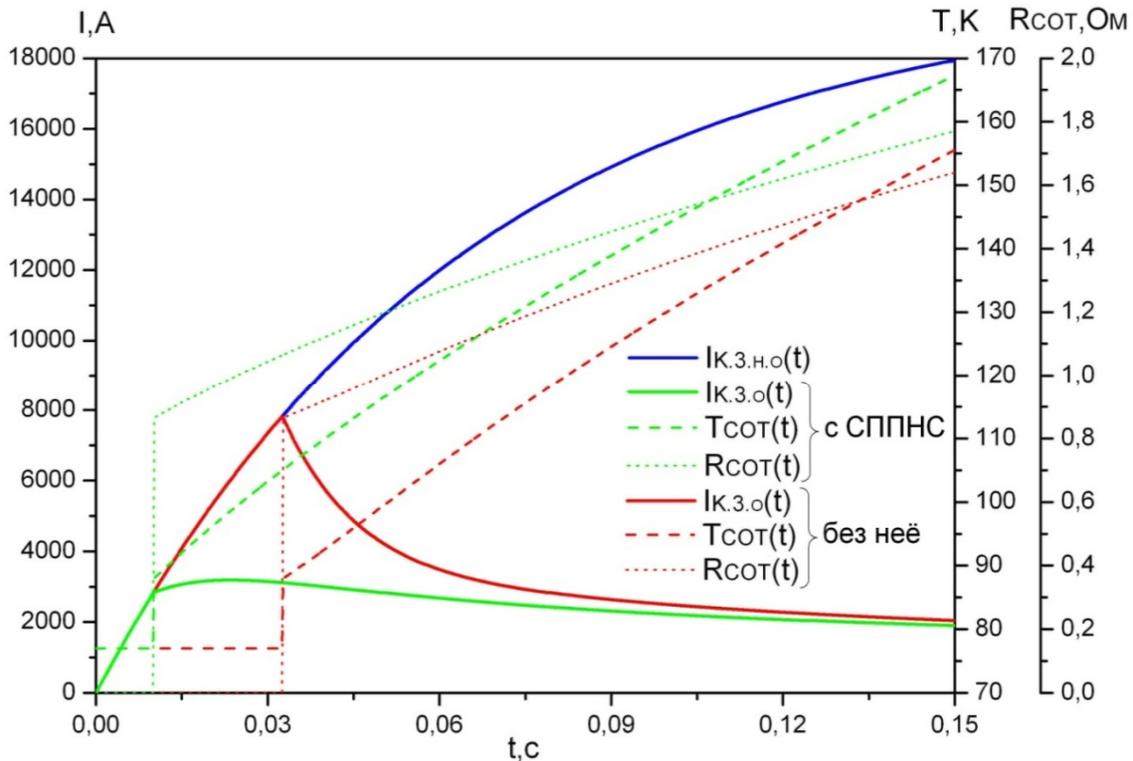


Рис. 8. Изменение тока к.з. при отказе фидерного выключателя

В случае отказа фидерного выключателя (рисунок 5) СОТ позволяет ограничивать ток к.з. на безопасном уровне в течение всего времени с момента возникновения к.з. до его от-

ключения выключателем на стороне переменного тока преобразовательного агрегата –  $I_{кз.о}$ . В противном случае при отсутствии СОТ ток к.з. может достичь установившегося значения

$I_{кз.но}$  со всеми вытекающими отсюда последствиями (выход из строя всей ТП). Из рисунка 7 видно, что использование СППНС весьма полезно для снижения тепловыделений внутри криостата СОТ во время его токоограничивающего действия. Однако и без этой системы СОТ гарантированно сработает при больших значениях тока. Также следует отметить, что не происходит разогрева токоограничивающих элементов до максимально допустимой температуры – 210К за расчётное время в 150мс. Связано это с частичным тепловыделением на внутреннем сопротивлении остальных элементов схемы замещения.

### Применение сверхпроводниковых ограничителей токов короткого замыкания в тяговых сетях переменного тока

Установка на тяговых подстанциях переменного тока сверхпроводниковых ограничителей токов короткого замыкания, позволит существенно снизить термическое и динамическое действие токов короткого замыкания на силовое оборудование и токоведущие части. Сверхпроводниковый ограничитель токов короткого замыкания является сверхбыстродействующим устройством (собственное время составляет менее 1 мс), которое обладает способностью ограничивать не только установившееся значение тока к.з., но и полностью срезать амплитуду сверхпереходного тока к.з., на что принципиально не способен ни один из самых совершенных быстродействующих выключателей.

Рассмотрим порядок взаимодействия СОТ с устройствами автоматики и защиты при его установке на вводах в распределительное устройство 27,5кВ.

Время работы современной защиты фидеров контактной сети переменного тока ЦЗАФ-27,5 составляет минимум 20мс, в то время как СОТ способен среагировать на к.з. и начать токоограничивающее действие в течение 1, в крайнем случае, 2мс. Следовательно, падение напряжения на токоограничивающем элементе СОТ можно использовать в качестве управляющего сигнала на принудительное отключение выключателей, которые будут отключать уже ограниченный ток к.з.

Это неоценимое качество СОТ с уверенностью можно использовать на фидерах контактной сети, не опасаясь за селективность, но устройства данного типа пока ещё дороги и оборудовать ими все фидера не представляется возможным. Остаётся вариант использования

СОТ на вводах в распределительное устройство тягового напряжения (РУ-27,5кВ) по одному на каждую фазу. Однако в этом случае СОТ будут ограничивать не только токи коротких замыканий возникающих на шинах РУ-27,5кВ, линиях ДПР (два провода рельс), в ячейках ТСН (трансформаторов собственных нужд), но и всех близких к.з. на фидерах контактной сети.

В настоящее время при коротком замыкании на фидере контактной сети электровозы, наиболее близко расположенные к месту к.з. и получающие питание от неповреждённых фидеров той же фазы, ввиду просадки напряжения на их токоприёмниках сбрасывают ток. Это связано с тем, что вентили установленных на электровозах преобразовательных агрегатов запираются от воздействия противоэдс тяговых двигателей. Следовательно, токоограничивающее действие СОТ при его размещении на вводах в РУ-27,5кВ не будет оказывать негативного влияния на существующие режимы работы электроподвижного состава. Более того, этот вариант установки СОТ открывает новые возможности в организации работы быстродействующих выключателей вводов РУ-27,5кВ и фидеров контактной сети, направленной на повышение надёжности отключения токов к.з. (рисунок 9).

В случае возникновения к.з. на фидере контактной сети СОТ, начиная токоограничивающее действие, подаёт сигнал на принудительное отключение выключателя ввода и всех выключателей, расположенных в первой ступени защиты. Выбор нужного выключателя осуществляется через схему совпадений сигналов, подаваемых СОТ и устройством защиты 3У (рисунок 9). Сигнал от 3У поступает при регистрации им протекающего по повреждённому фидеру тока величиной  $0,6-0,7I_k$  СОТ. Для предотвращения дублирующих отключений во второй ступени защиты выключатель ввода работает со сравнительно небольшой выдержкой времени, примерно в полтора раза большей полного времени отключения вакуумного выключателя на фидере контактной сети.

В случае возникновения к.з. между фазами *a* и *b* на шинах распределительного устройства, в линии ДПР или на стороне высокого напряжения в ячейке ТСН токоограничивающее действие СОТ может наблюдаться в обеих фазах, приводя к недопустимо высоким перенапряжениям на индуктивности защищаемой цепи. Для предотвращения коммутационных перенапряжений целесообразно использовать СОТ с разными значениями критического тока –  $I_k$ , опре-

деляющими их токи уставки. Имея меньшую уставку, СОТ в одной из фаз ввода всегда будет вступать в работу (выполнять токоограничивающее действие) первым, предотвращая тем самым срабатывание токоограничителя во второй фазе. В остальном работа схемы ничем не от-

личается, за исключением случаев возникновения к.з. между шинами *a* и *b* распределительного устройства, при которых отключение выключателя ввода начнётся не сразу, а по истечении выдержки времени – через 60мс.

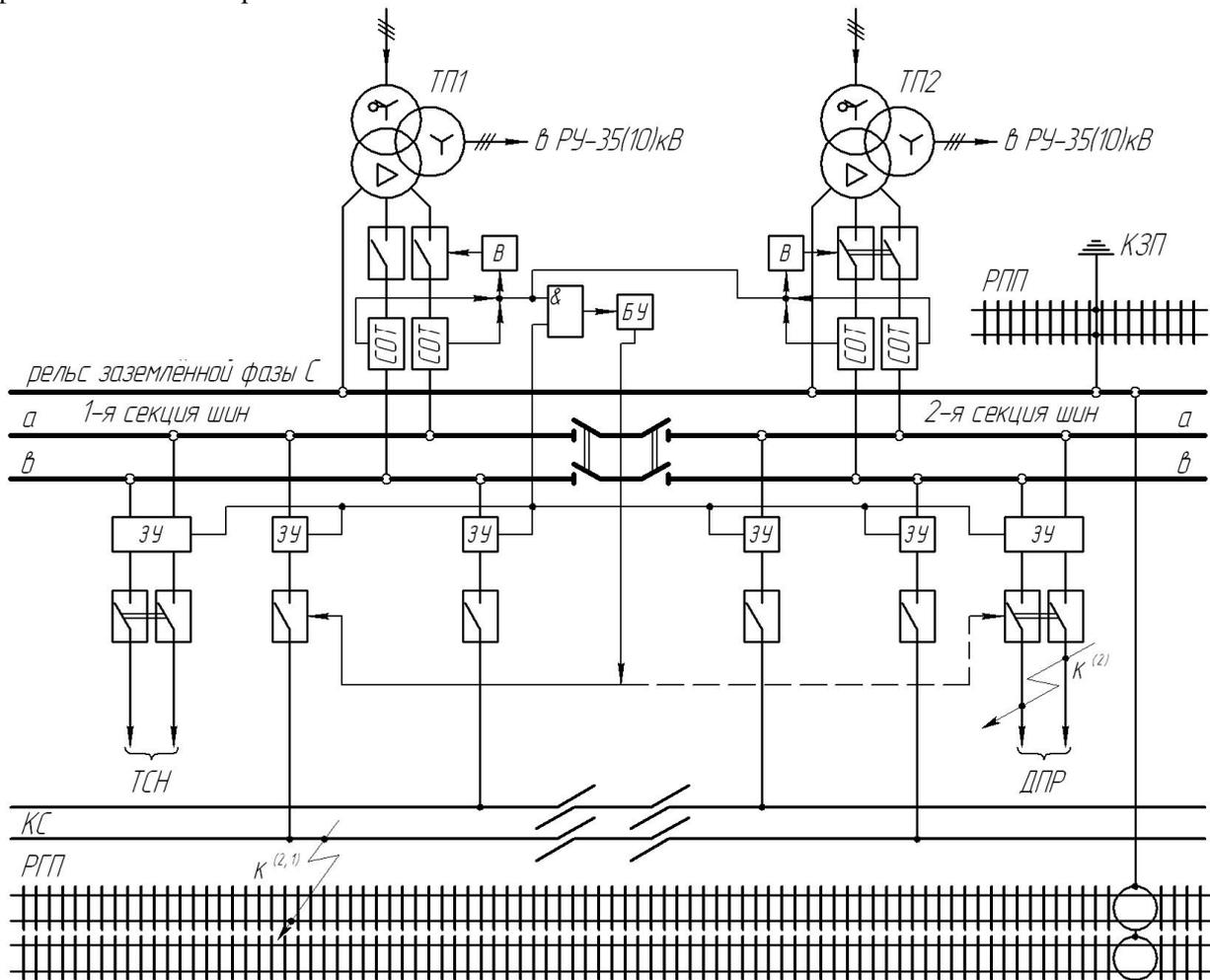


Рис. 9. Схема организации работы коммутационной аппаратуры при установке комплекта из четырёх однофазных СОТ на вводах в РУ-27,5кВ (справедлива также в случае установки комплекта из двух однофазных СОТ)

Проанализируем максимально возможное время токоограничивающего действия СОТ –  $t_{\max \text{ т.д.}}$  в случае возникновения к.з. в контактной сети и отказе фидерного выключателя, исходя из времени работы ЗУ, выдержки времени второй ступени защиты и полного времени отключения вакуумного выключателя ввода РУ-27,5кВ. Время действия современных микропроцессорных защит составляет не менее 20мс, а полное время отключения вакуумного выключателя 40мс, поэтому с учётом выдержки времени второй ступени защиты –  $t_{\max \text{ т.д.}} = 20 + 1,5 \cdot 40 + 40 = 120\text{мс}$ . Полученная величина на 30мс меньше расчётного времени токоограничивающего действия СОТ, которое наверняка будет компенсировано при его установке для

совместной работы с другими типами быстродействующих коммутационных аппаратов.

Рассмотрим имитационное моделирование токоограничивающего действия СОТ в тяговой сети переменного тока при его установке на вводах РУ-27,5кВ и отказе фидерного выключателя.

Имитационное моделирование токоограничивающего действия СОТ проводилось применительно к тяговой подстанции с обмоткой первичного напряжения 220кВ. При моделировании за основу взят наиболее тяжелый случай – отказ фидерного выключателя, определяющий допустимое время токоограничивающего действия СОТ, величина которого принята равной 150мс. Также принято, что восстановление токоограничивающим элементом СОТ сверх-

проводящих свойств укладывается в характерные времена работы механизма АПВ.

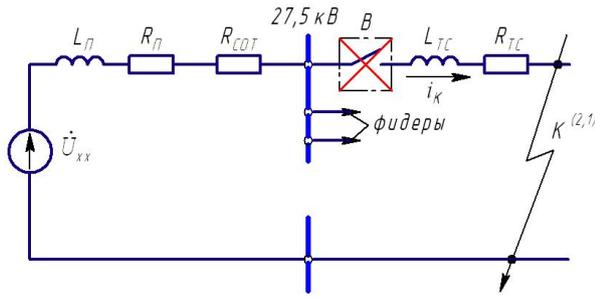


Рис. 10. Схема замещения случая близкого глухого к.з. при отказе фидерного выключателя и наличии СОТ на вводах в РУ-27,5кВ

На схеме замещения (рисунок 10) приняты следующие обозначения элементов:

$\dot{U}_{xx}$  – напряжение холостого хода на шинах тяговой подстанции (действующее значение);

$L_{П}, R_{П}$  – эквивалентное сопротивление и индуктивность ТП, определяемые параметрами первичной питающей системы, мощностью и числом понижающих трансформаторов;

$R_{ТС}, L_{ТС}$  – удельное сопротивление и индуктивность тяговой сети (суммарные значения

последовательно соединенных и индуктивно связанных контактной и рельсовой сетей);

$R_{СОТ}$  – первоначально вводимое в цепь активное сопротивление СОТ;

Все элементы схемы замещения считаются линейными, кроме  $R_{СОТ}$ , для которого будет приведена только первоначально вводимая им в цепь протекания тока величина активного сопротивления. Параметры схемы замещения для ТП представлены в таблице ПЗ.

Для случая, представленного схемой замещения, имитационное моделирование проводилось при разных значениях начальной фазы короткого замыкания: 0, 30, 60 и 90 электрических градусов с использованием компьютерной программы, модернизированной применительно к тяговым сетям переменного тока. Основу этой компьютерной программы, как и на постоянном токе, составила общая математическая модель работы ВТСП токоограничителя резистивного типа. Полученные временные зависимости, соответственно, представлены на рисунках 11-14.

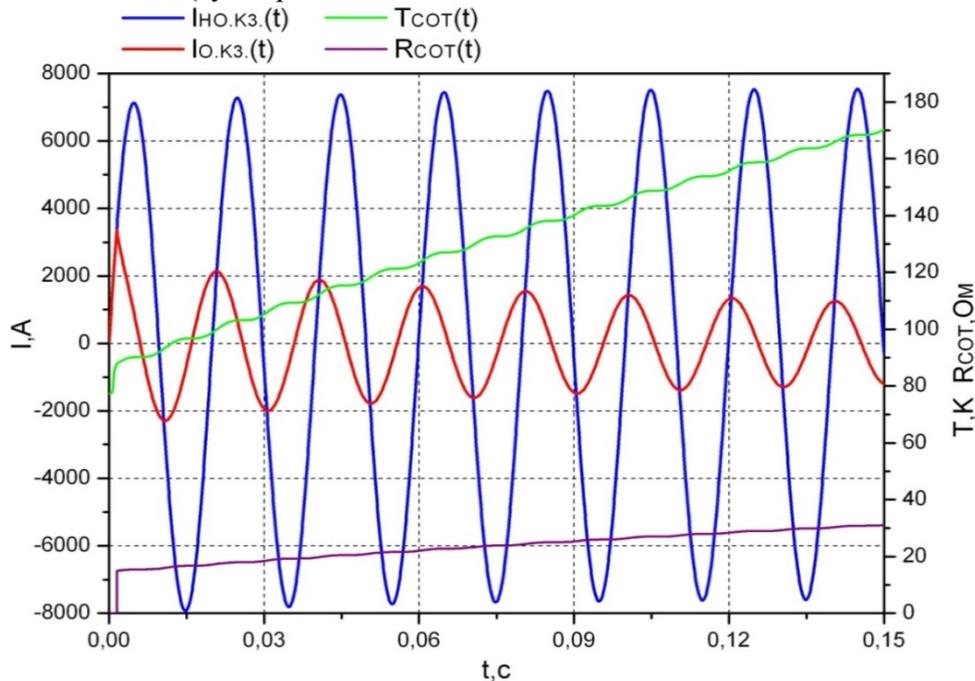


Рис. 11. Токоограничивающее действие СОТ на вводах РУ-27,5кВ ТП при отказе фидерного выключателя и начальной фазе к.з.  $\psi_k = 0$  эл.град

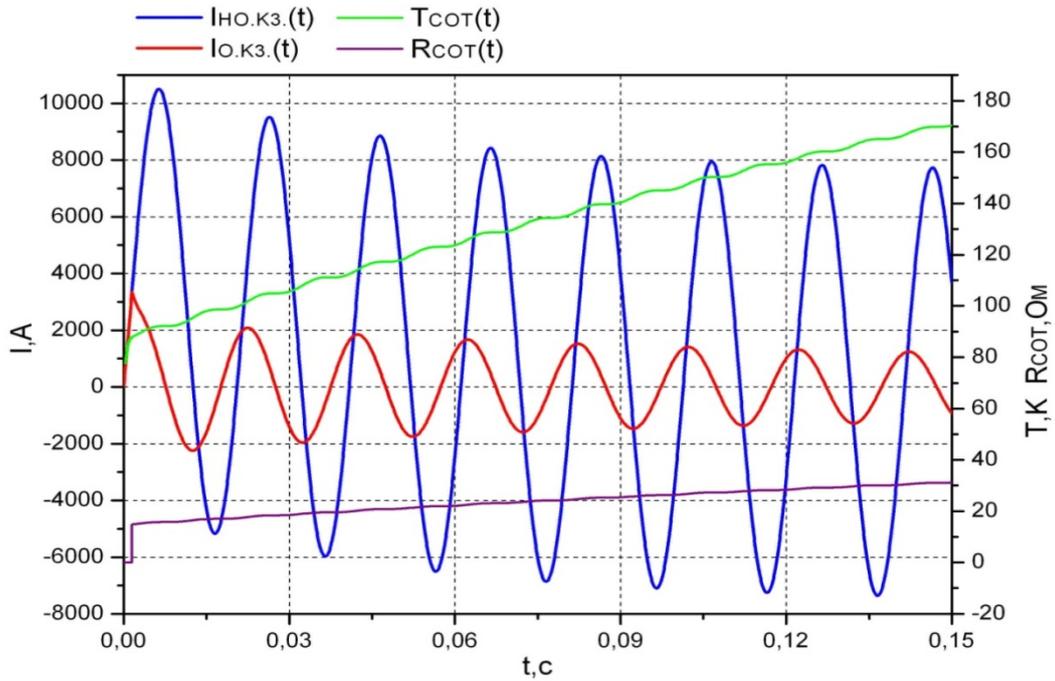


Рис. 12. Токоограничивающее действие СОТ на вводах РУ-27,5кВ ТП при отказе фидерного выключателя и начальной фазе к.з.  $\psi_k = 30$  эл.град

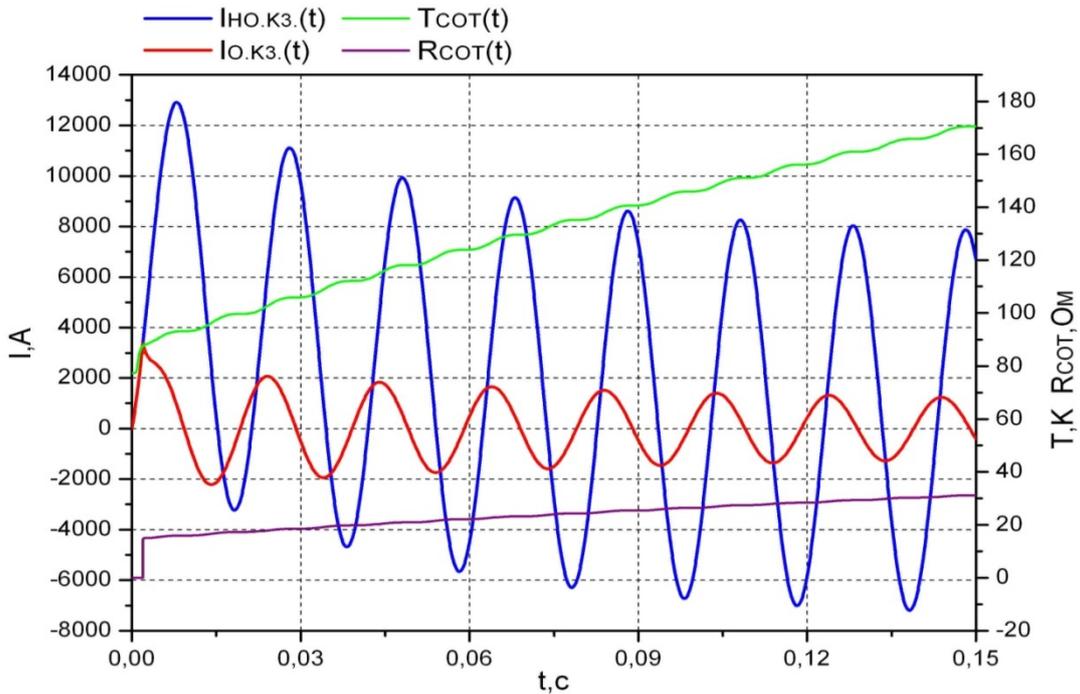


Рис. 13. Токоограничивающее действие СОТ на вводах РУ-27,5кВ ТП при отказе фидерного выключателя и начальной фазе к.з.  $\psi_k = 60$  эл.град

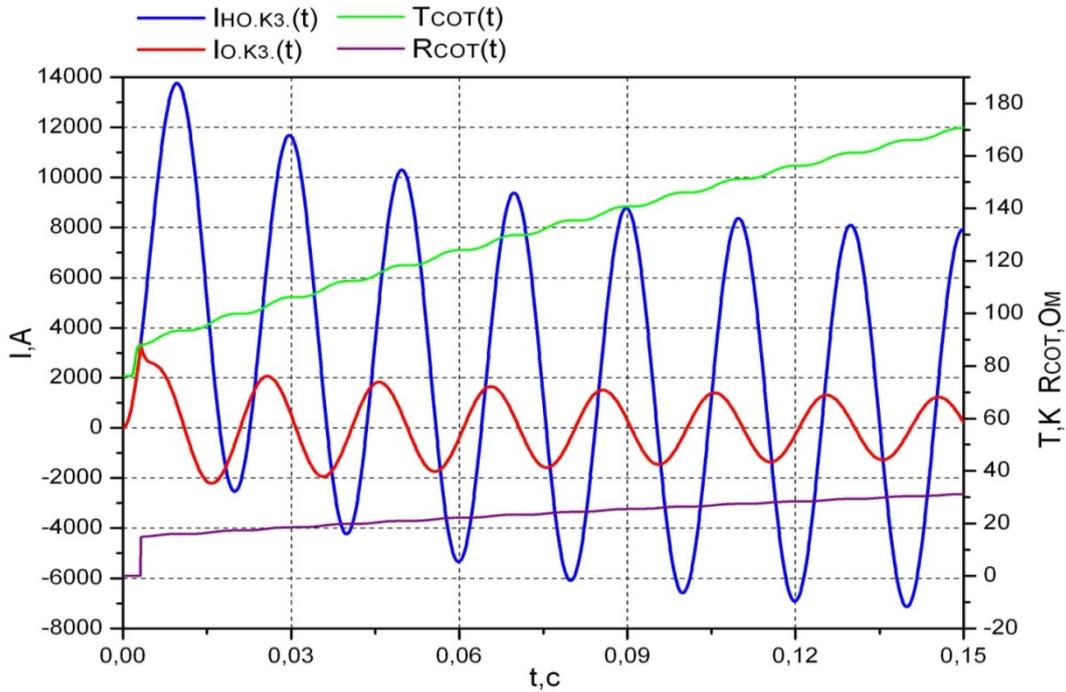


Рис. 14. Токоограничивающее действие СОТ на вводах РУ-27,5кВ ТП при отказе фидерного выключателя и начальной фазе к.з.  $\psi_k = 90$  эл.град

Из представленных на рисунках 11-14 временных зависимостей видно, что СОТ действительно является безинерционным токоограничивающим устройством, единственно способным полностью срезать амплитуду ударного тока к.з. Отмечено, что изменение начальной фазы короткого замыкания при прочих равных условиях практически не влияет на конечную температуру нагрева токоограничивающего элемента СОТ, в отличие от частичного рассеяния энергии на остальных элементах схемы замещения.

### Выводы

1. Проведённый анализ показывает, что с установкой СОТ действительно происходит снижение термического и динамического воздействия токов к.з. (согласно квадрату снижения его амплитудного значения) на коммутационные аппараты, токоведущие части и силовое оборудование ТП постоянного тока.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бадер, М.П. Концепция обновления и перспективы технического развития систем тягового электроснабжения / М.П. Бадер, В.Г. Сыченко // *Технічна електродинаміка*, Темат. вип. Силова електроніка та енергоефективність, Ч. 2., 2009. – С. 88-93.
2. Бадер, М.П. Освоение в тяговом электроснабжении электрооборудования на основе высокотемпературной сверхпроводимости и его электромагнитная совместимость / М.П. Бадер // *Электроника и электрооборудование транспорта*. 2013, № 5, с. 43-47.

2. Результаты проведённых теоретических исследований возможного использования СОТ на фидере постоянного тока наглядно иллюстрируют, что его установка вместо одного из быстродействующих выключателей постоянного тока полезна, но не так необходима, как на переменном токе.

3. Проведённое расчётно-теоретическое исследование токоограничивающего действия СОТ при его установке на вводах в РУ-27,5 кВ наглядно показало колоссальный технический эффект, недостижимый для других типов токоограничивающих устройств и тем более для вакуумной коммутационной аппаратуры.

4. Целесообразность использования СОТ в силовых цепях действующих ТП системы тягового электроснабжения переменного тока должна быть освещена с экономической точки зрения, которая, несомненно, имеет место быть, если не сейчас, то в обозримом будущем.

### REFERENCES

1. Bader M.P., Sychenko V.G. Kontsepsiya obnoveniya i perspektivy tekhnicheskogo razvitiya sistem tyagovogo elektrosnabzheniya [The concept of renovation and technological development prospects traction power supply systems]. *Tekhnichna elektrodynamika - Technical electrodynamics*, 2009, pp. 88-93.
2. Bader M.P. Osvoenie v tyagovom elektrosnabzhenii elektrooborudovaniya na osnove vysokotemperaturnoy sverkhprovodimosti i ego elektromagnitnaya sovmestimost' [Mastering in electrical traction power supply on the basis of high-temperature superconductiv-

3. Бадер, М.П. Электромагнитная совместимость системы тягового электроснабжения и элементов инфраструктуры на участках с высокоскоростным движением / М.П. Бадер, Ю.М. Иньков // Электротехника. 2014 г., № 8, с. 12-18.

ity and its electromagnetic compatibility]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta - Electronics and electrical transport*, 2013, no.5, pp. 43-47.

3. Bader M.P., In'kov Yu.M. Elektromagnitnaya sovместimost' sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya i elementov infrastruktury na uchastkakh s vysokoskorostnym dvizheniem [Electromagnetic compatibility of systems and traction power supply of infrastructure in areas with high traffic]. *Elektrotekhnikha - Electrical Engineering*, 2014, no. 8, pp. 12-18.

Поступила в печать 01.12.2012.

Внутренний рецензент *Сыченко В. Г.*

Внешний рецензент *Сокол Е. И.*

Использование и освоение сверхпроводниковых технологий и нового высокотемпературного сверхпроводникового электротехнического оборудования в локомотивной и стационарной энергетике позволит принципиально новым образом решить вопросы повышения надежности и эффективности тягового электроснабжения, экономии электроэнергии.

Установка на тяговых подстанциях (ТП) сверхпроводниковых ограничителей токов (СОТ) позволит существенно снизить термическое и динамическое действие токов короткого замыкания на силовое оборудование и токоведущие части.

Имитационное моделирование токоограничивающего действия СОТ проводилось применительно к ТП на участке с интенсивным пригородным движением. Проведенные исследования показали, что сверхпроводниковый ограничитель токов короткого замыкания является сверхбыстродействующим безинерционным устройством, которое обладает способностью ограничивать не только установившееся значение тока к.з., но и полностью срезать амплитуду сверхпереходного тока к.з., на что не способен ни один из самых совершенных быстродействующих выключателей. Отмечено, что изменение начальной фазы короткого замыкания при прочих равных условиях практически не влияет на конечную температуру нагрева токоограничивающего элемента СОТ.

Проведенные расчетно-теоретические исследования токоограничивающего действия СОТ при его установке на вводах в РУ-27,5 кВ наглядно показали колоссальный технический эффект, недостижимый для других типов токоограничивающих устройств и тем более для вакуумной коммутационной аппаратуры.

**Ключевые слова:** сверхпроводимость; ограничение тока; электрическая тяга; коммутационная аппаратура.

УДК 621.331.3

М. П. БАДЬОР, В. В. ЛОБИНЦЕВ (МПТ)

Кафедра Энергопостачання електричних залізниць, Московський державний університет шляхів сполучення, вул. Образцова 9, буд. 9, Москва, Російська Федерація, 127994, тел.: (495) 684-22-87, ел. пошта: [badjor@mail.ru](mailto:badjor@mail.ru)

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І ОСВОЄННЯ В ТЯГОВОМУ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННІ ОБМЕЖУВАЧІВ СТРУМУ НА ОСНОВІ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ НАДПРОВІДНОСТІ

Використання та освоєння надпровідникових технологій і нового високотемпературного надпровідникового електротехнічного обладнання в локомотивній і стаціонарній енергетиці дозволить на принципово новому рівні вирішити питання підвищення надійності та ефективності тягового електропостачання, економії електроенергії.

Установка на тягових підстанціях (ТП) надпровідникових обмежувачів струмів (НОС) дозволить істотно знизити термічну і динамічну дію струмів короткого замикання на силові устаткування та струмоведучі частини.

Імітаційне моделювання струмообмежувальної дії НОС проводилося стосовно до ТП на ділянці з інтенсивним приміським рухом. Проведені дослідження показали, що надпровідниковий обмежувач струмів короткого замикання є надшвидкодіючим безінерційним пристроєм, який має здатність обмежувати не тільки сталі значення струму к.з., але і повністю зрізати амплітуду надперехідного струму к.з., на що не здатен жоден з найдосконаліших швидкодіючих вимикачів. Відзначено, що зміна початкової фази короткого замикання за інших рівних умов практично не впливає на кінцеву температуру нагрівання струмообмежувального елемента НОС.

Проведені розрахунково-теоретичні дослідження струмообмежувальної дії НОС при його установці на вводах в РП-27,5 кВ наочно показали колосальний технічний ефект, недосяжний для інших типів струмообмежувачів пристроїв і тим більше для вакуумної комутаційної апаратури.

**Ключові слова:** надпровідність; обмеження струму; електрична тяга; комутаційне обладнання.

Внутрішній рецензент *Сиченко В. Г.*

Зовнішній рецензент *Сокол С. І.*

© Бадёр М.П., Лобынцев В.В., 2015

UDC 621.331.3

M. P. BADER, V. V. LOBYNTSEV (MIIT)

Department of Energy supply of electric railways, Moscow State University of Transport Communications,  
9 Obraztsova Street, build. 9, Moscow, Russia Federation, 127994, тел.: (495) 684-22-87,  
e-mail: [badjor@mail.ru](mailto:badjor@mail.ru)

## MATHEMATICAL MODELING AND IMPLEMENTATION IN TRACTION POWER SUPPLY CURRENT LIMITER BASED ON HIGH SUPERCONDUCTIVITY

The use and development of superconductor technologies and new high-temperature superconducting electrical equipment in the locomotive and stationary power will enable a fundamentally new level to solve the issues of improving the reliability and efficiency of the traction power supply, energy saving.

Installation of traction substations (TS) of superconducting current limiters (SCL) will significantly reduce the thermal and dynamic effects of short circuit currents in the power equipment and live parts.

Simulation modeling of current-limiting action SCL was conducted with respect to the TS at the site with heavy commuter traffic. Studies have shown that the superconducting limiting short-circuit currents, superfast without inertia is a device that has the ability to restrict not only the steady short-circuit current value, but also completely cut off amplitude subtransient short-circuit current, what can not, none of the most advanced high-speed switches. It is noted that the change in the initial phase of a short circuit, ceteris paribus virtually no effect on the final temperature of the heating element current-limiting cells.

Made settlement and theoretical studies of current-limiting action SCL when mounted on the bushings to 27.5 kV clearly shown enormous technical effect, inaccessible to other types of current-limiting devices and especially for vacuum switchgear.

**Keywords:** superconductivity; current limitation; electric traction; commutation equipment.

Internal reviewer *Sychenko V. G.*

External reviewer *Sokol Ye. I.*