

Васин Владислав Петрович окончил ЭЭФ МЭИ в 1960 г. В 1988 г. защитил докторскую диссертацию «Развитие топологических методов исследования ре-

жимов электроэнергетических систем» в МЭИ. Главный технолог ПАО «СПКБ РР».

Elektrichestvo (Electricity), 2017, No.1, pp. 22–29.

Reliability Analysis of Power Supply 20 kV in the Metropolis

MAIOROV Andrei Vladimirovich (Public Company «United Energy Company», Moscow, Russia) — Director General

SHUNTOV Andrei Vyacheslavovich — (Public Company «Specialized Design Bureau for Repair and Reconstruction (PC «SDBRR», Moscow, Russia) — Director General, Dr.Sci.(Eng.)

VASIN Vladislav Petrovich (PC «SDBRR», Moscow, Russia) — Chief Technologist, Dr.Sci. (Eng.)

Investigated the reliability of the power supply system of 20 kV on the example of a specific circuit of a large object. Are taken into account for the first time obtained in the domestic practice of performance reliability of the 20 kV electrical network elements. The basis of the method of evaluating the reliability of put a three-level decomposition of the electricity network: transformer substations 20/0,4 kV, distribution and supply of 20 kV cable lines. Recommendations for backup power supply systems in the city.

Key words: *electrical networks 20 kV, reliability probability of customers repayment, reservation*

* * *

Электричество, 2017, № 1, с. 29–34.

Использование взрывных технологий для построения компактного токоограничивающего устройства класса 110 кВ¹

ШУРУПОВ М.А., ШУРУПОВ А.В., КОЗЛОВ А.А., КОТОВ А.В.

Рассмотрена возможность создания быстродействующего токоограничивающего устройства класса 110 кВ на новых физических принципах, а именно, на основе коммутаторов взрывного типа. Время перехода в режим токоограничения соответствует устройствам нового поколения и составляет 2 мс. Предлагается эквивалентная схема разработанного устройства и проводится ее параметрический анализ, который показывает перспективность разработанной схемы как токоограничивающего устройства нового поколения и может стать одной из ключевых составляющих безопасности сетей в будущем. Рассматриваемое токоограничивающее устройство способно осуществлять отключение сети в первом полупериоде после начала КЗ при существенной глубине токоограничения и небольшом уровне перенапряжений. Представляется важным дальнейшее экспериментальное исследование предлагаемой схемы.

Ключевые слова: *токоограничивающие устройства, высоковольтный коммутатор взрывного типа, плавкий коммутационный элемент, безындукционный резистор, короткое замыкание*

Развитие современных систем электроснабжения, в том числе так называемых активно-адаптивных сетей (Smart grid), неизбежно связано с увеличением как генерируемых мощностей, так и «плотности» электрической сети. Все это приводит к созданию крупных объединенных энергосистем. В условиях современных мегаполисов ситуация осложняется недостатком места, что исключает установку излишне габаритного оборудования. Неиз-

бежным следствием этого становится увеличение максимальных токов короткого замыкания (КЗ), что требует комплексной работы по их координации.

Согласно данным [1] прогноз значения максимального тока КЗ в сети 110 кВ на этапе 2015 г. (в сравнении с 2011 г.) без учёта применения дополнительных мероприятий по ограничению токов КЗ составляет 64,3 кА (прирост 36,8%). При этом существующие серийные выключатели способны отключать ток в 63 кА, что уже является недостаточным и тем более не применимо даже в краткосроч-

¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-50-00124).

ной перспективе. Превышение тока КЗ отключающей способности современных выключателей, обеспечивающих локализацию и ликвидацию аварий в системе, приводит к росту экономических потерь, в том числе и за счёт взрывов и пожаров на энергообъектах.

Для ограничения токов КЗ применяются схемотехнические методы — вставки постоянного тока, секционирование сети и т.д., а также устройства ограничения токов КЗ — токоограничивающие реакторы, резонансные LC-контуры, схемы с полупроводниковыми или газоразрядными выключателями и т.д.

Первый подход целесообразен при достаточно больших масштабах сети. К примеру, излишне мелкое секционирование уменьшает надёжность электроснабжения потребителей, увеличивает потери в системе и снижает качество напряжения для конечного потребителя. В свою очередь, вставки постоянного тока являются дорогостоящими и габаритными сооружениями, что делает их применение затруднительным, особенно в условиях мегаполиса.

Второй подход используется также и для локальных потребителей, и отдельных подстанций. Существует множество схем исполнения токоограничивающих устройств [2] — от простых токоограничивающих реакторов до сложных систем с трансформаторными связями и силовыми полупроводниковыми элементами. Отдельно можно отметить применение высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) элементов в различных вариантах токоограничителей. Использование сверхпроводимости позволяет создавать устройства фактически без системы управления с естественным переходом вещества в нормальное проводящее состояние при превышении установленной плотности тока. Кроме того, подобные схемы характеризуются низким уровнем потерь в нормальном режиме работы. Однако экономическая целесообразность подобных систем пока обусловлена лишь перспективами создания новых поколений ВТСП.

Общие технические требования, предъявляемые к современным токоограничивающим устройствам [3]:

высокое быстродействие (время перехода в режим ограничения тока с момента возникновения тока КЗ) не более 2—3 мс;

ограничение ударного и установившегося тока до допустимых значений или заданного уровня;

невнесение существенных нелинейных искажений в параметры сети, прежде всего в нормальном режиме её работы;

отсутствие существенного влияния на режим работы сети;

достаточно стабильные характеристики при изменении схемы сети;

отсутствие отрицательного влияния на функционирование других элементов сети и систем защиты;

автоматическое срабатывание и восстановление после устранения тока КЗ.

Удовлетворяющие этим критериям токоограничивающие устройства (ТОУ) могут быть основаны на различных физических принципах. В частности, ТОУ с применением сверхпроводимости, нового поколения полупроводников и высоковольтных коммутаторов взрывного типа принципиально могут обеспечить ограничение и быстродействующее отключение тока КЗ за время не более полупериода частоты питающей сети. В различных областях промышленности и в системах электроснабжения в диапазоне 2,8—38 кВ в зарубежной практике достаточно широко применяются коммутационные ограничители тока КЗ на основе коммутаторов взрывного типа. Примером могут служить коммутационные ограничители тока КЗ типа CLiP производства фирмы G&W ELECTRIC CO (США) и Is-limiter фирмы АВВ (Швейцария). Решение задачи ограничения токов КЗ в сетях 110 кВ и выше, независимо от физического принципа реализации, связано с необходимостью ограничения уровня коммутационного напряжения (сотни киловольт) и гашения значительной (десятки мегаджоулей) энергии сети, соответствующей нескольким килограммам в тротиловом эквиваленте. В коммутаторах типа CLiP и Is-limiter более низкого класса напряжений ввиду существенно меньших значений рассеиваемой энергии эту проблему удастся решить за счёт плавкого коммутатора с требуемой токово-резистивной характеристикой. Однако для быстродействующих ТОУ, работающих в сетях напряжением 110 кВ и выше, применение данного технического приёма недостаточно, необходимо использовать альтернативные подходы.

Высоковольтные коммутаторы взрывного типа как основа для построения токоограничивающего устройства класса 110 кВ. Для решения обозначенных выше проблем коллективом специалистов Шатурского филиала Объединённого института высоких температур РАН разработана оригинальная схема токоограничивающего устройства для сетей 110 кВ, представленная на рис. 1.

Обычные (масляные) выключатели обеспечивают отключение сети примерно за 3 периода рабочего режима, т.е. примерно за 60 мс. Учитывая амплитудные значения токов КЗ и напряжение сети, выделяемая при этом энергия оказывается на неприемлемом уровне. Разработанное устройство согласно вышеизложенным требованиям относится к

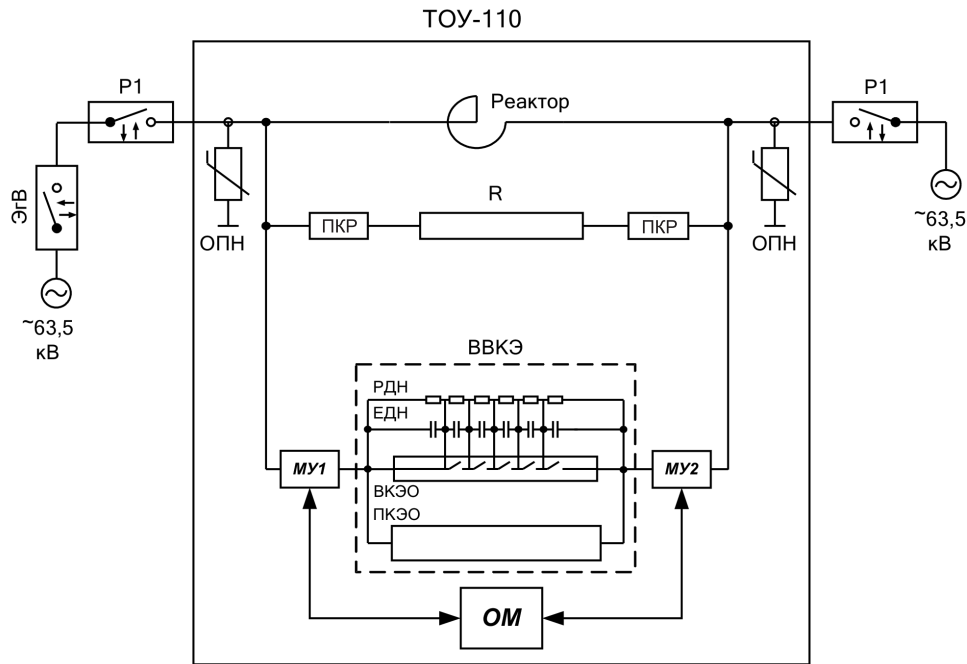


Рис. 1. Функциональная схема токоограничивающего устройства на основе высоковольтных коммутаторов взрывного типа

поколению устройств с временем коммутации около 2 мс, т.е. прежде всего решает задачу ограничения ударного тока в первом периоде с момента возникновения КЗ. При этом необходимо отключать (переключать) ток при значениях амплитуды, достигающих десятков килоампер. Учитывая большие монтажные значения индуктивности (10–20 мГн) линий передач высоких классов напряжения и малые значения времени переключения (1–2 мс), неизбежны высокие коммутационные напряжения, достигающие без дополнительных мер 1 МВ.

Общая схема ТОУ на основе взрывного коммутатора, представленная на рис. 1, содержит несколько основных элементов:

две дублирующие друг друга системы управления (МУ1 и МУ2);

высоковольтный взрывной коммутационный элемент (ВВКЭ) с плавким коммутационным элементом цикла отключения (ПКЭО) и дополнительными резистивным и емкостным делителями;

безындукционный резистор с плавкими коммутаторами (ПКР);

специальный реактор.

Ключевыми особенностями данной схемы являются принципиально новый быстродействующий коммутационный элемент взрывного типа с высоким значением восстанавливающего напряжения, а также согласование токово-резистивных характеристик плавких коммутационных элементов с параметрами безындукционного резистора и специального реактора.

Разработанный взрывной коммутатор состоит из разрывной токонесущей шины и параллельно

включенного плавкого коммутационного элемента. Коммутатор способен выдержать напряжение до 70 кВ на единичный разрыв, что приводит к необходимости секционирования системы для достижения требуемых восстанавливающих напряжений. По нашим оценкам, для построения ТОУ класса 110 кВ потребуется 5 разрывов во взрывном коммутаторе. Плавкий коммутационный элемент представляет собой токоограничивающий предохранитель, выполненный из профилированной алюминиевой ленты в песке заданной фракции. Одним из основных параметров элемента является минимальное сечение, которое выбирается из соображений соответствия необходимого для расплава алюминия интеграла действия тока, а также установленных значений токовой отсечки и задержки для взрывного коммутатора. Существенно, что плавкий коммутационный элемент соединяется параллельно со всем каскадом разрывов основной шины.

Алгоритм работы разработанного ТОУ следующий. При превышении током КЗ установленной отсечки на заданное время (примерно 100 мкс, для защиты от ложного срабатывания) системы управления, дублируя друг друга, подают команду на подрыв взрывного коммутатора. Время восстановления электрической прочности коммутатора составляет около 700 мкс, что при общей нестабильности срабатывания отдельных разрывов в 50 мкс гарантирует полное отключение цепи коммутатора за 1 мс. Однако для ограничения перенапряжения при резком обрыве цепи взрывного коммутатора на заданных значениях тока КЗ его необходимо шунтировать. Эту роль выполняет плавкий коммутаци-

онный элемент. Его параметры подобраны так, чтобы обеспечить задержку примерно в 1 мс до перехода в режим токоограничения, т.е. до расплавления в области минимального сечения и переходу к режиму горения дуги. Такая задержка обеспечивает устойчивую работу взрывного коммутатора без возникновения дуги на разрывах. Дальнейшая роль плавкого коммутационного элемента (ПКЭ) сводится к плавному переключению тока в цепь безындукционного резистора и плавких коммутаторов.

Динамика переключения тока от плавкого элемента в последующие определяется профилированием проводника ПКЭ. Однако даже при плавном переключении тока в резистор существует проблема возникновения перенапряжения на его собственной индуктивности. Поэтому появилась необходимость создания безындукционного резистора с высоким значением тепловой емкости. Расчёты показали, что функцию ограничителя напряжения резистор будет выполнять при собственном значении индуктивности не более 100 мкГн и при сопротивлении не более 10 Ом. Для решения указанной задачи была разработана оригинальная конструкция безындукционного резистора, защищенная патентом РФ [4]. Резистор решает проблемы ограничения перенапряжения и поглощения энергии сети при подключении специального реактора. Завершающая стадия процесса токоограничения — выгорание плавких коммутаторов в цепи резистора и окончательное переключение тока в специальный реактор.

Специальный реактор в составе описываемого ТОУ существенно отличается от токоограничивающих реакторов, используемых непосредственно для токоограничения. Во-первых, в нормальном режиме работы он шунтирован толстой шиной взрывного коммутатора и фактически не оказывает влияния на режим работы сети. С другой стороны, при

аварийном режиме работы можно ожидать лишь кратковременного включения реактора в цепь (вплоть до срабатывания штатных выключателей), т.е. общее время включения реактора составляет не более 1 с. Вышесказанное существенно снижает требования к самому реактору и глубине токоограничения. В итоге возможно использование реактора с реактивным сопротивлением не менее 10 Ом без необходимости решения проблем с теплоотводом. Единственным ограничением для реактора является необходимость сдерживания ударных токов при его подключении в цепь.

Численный расчет различных режимов работы ТОУ-110. Верификация конструкции. Для анализа работы ТОУ было использовано специальное программное обеспечение PSPICE [5] с применением эквивалентной электрической схемы однофазного КЗ на землю в сети 110 кВ (рис. 2).

Параметры монтажной индуктивности длинной линии (R_1 , L_1) и нагрузки (R_H) в этой схеме были подобраны исходя из условия превышения током КЗ отключающей способности выключателя на 63 кА. Сопротивление шунтирующего резистора $R_2 = 7,5$ Ом, а собственная индуктивность $L_2 = 50$ мкГн; индуктивность реактора $L_3 = 20$ мГн.

Так как время запаздывания, определяемое работой плавкого коммутационного элемента (ПКЭ), на отключение тока КЗ достаточно велико и составляет от 1 до 1,5 мс, то имитацию КЗ целесообразно провести в начале полупериода сетевой частоты. Это определяется тем, что производная тока в такой момент максимальна и запаздывание на отключение ПКЭ приведет к максимальному значению ударного тока КЗ. При анализе работы представленной схемы предполагается простая модель работы плавкого размыкателя, считается, что его сопротивление растёт линейно во времени от 0,1 МОм до 300 Ом за время в 1 мс. Результаты проведенных расчетов приведены на рис. 3.

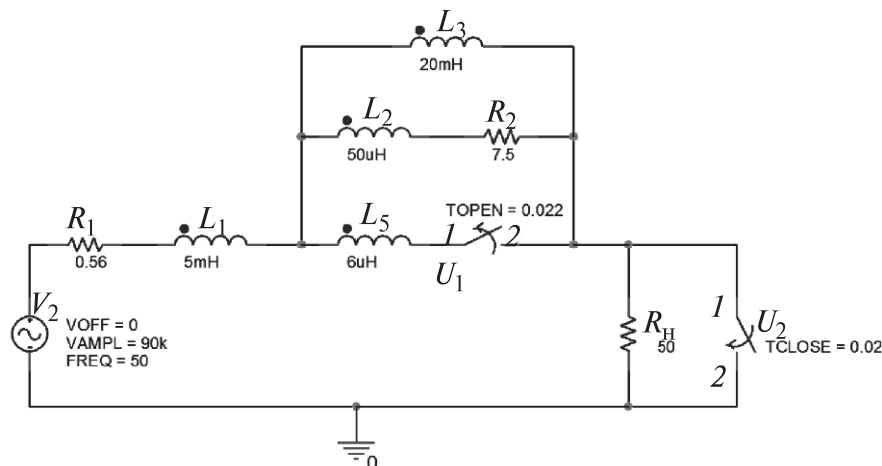


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема однофазного КЗ на землю в сети 110 кВ

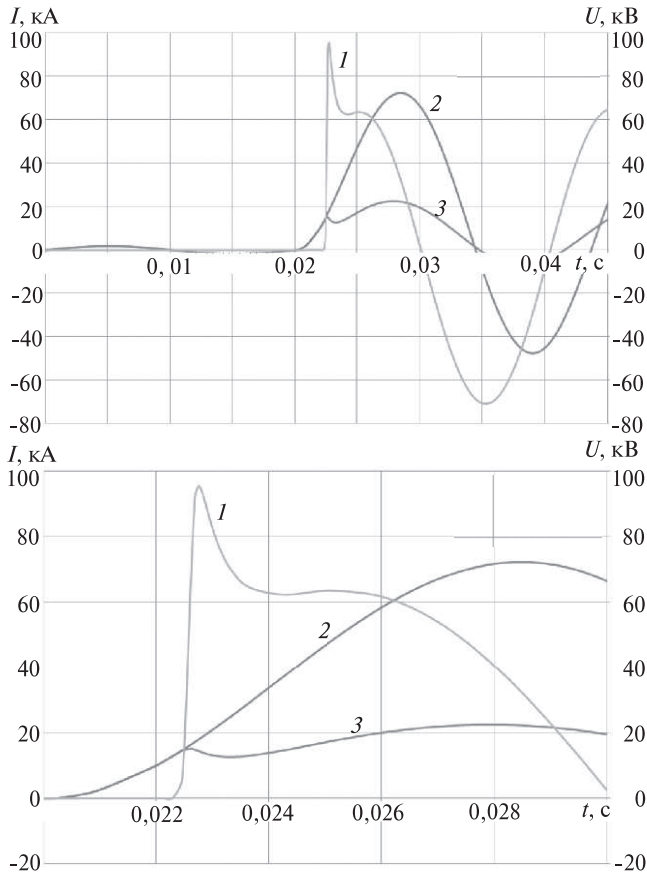


Рис. 3. Расчетные осциллограммы токов однофазного КЗ: 1 – напряжение; 2 – ток без ТОУ; 3 – ток с ТОУ

Из кривых на рис. 3 видно, что применение резистивно-индукционного реактора в сочетании с взрывными размыкателями принципиально снижает уровень ударных токов и перенапряжений по сравнению со схемами на основе чисто индуктивных реакторов. Таким образом, применение указанного реактора в качестве токоограничивающего устройства оправдано и перспективно в схемах с ограниченным временем токоограничения.

Для определения зависимости режимов работы ТОУ от параметров токоограничивающего реактора (сопротивления и индуктивности) был проведен параметрический анализ глубины токоограничения

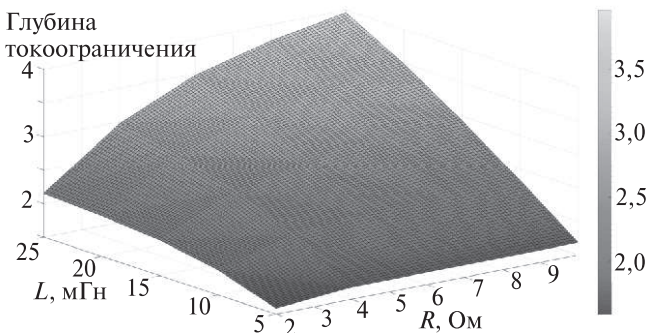


Рис. 4. Расчетная глубина токоограничения в зависимости от параметров ТОУ-110

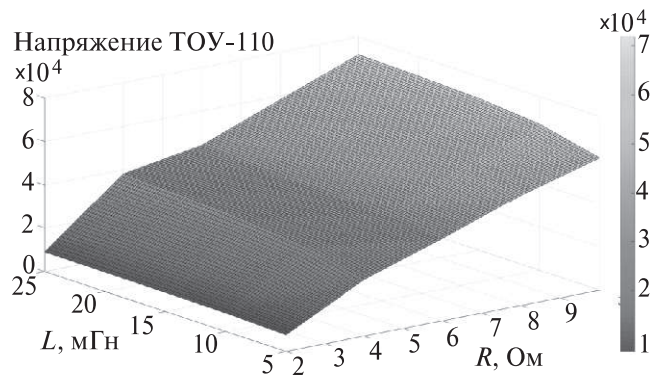


Рис. 5. Расчетный уровень перенапряжений в зависимости от параметров ТОУ-110

для режима КЗ в постановке, аналогичной указанной выше (рис. 2). Сосредоточенные параметры эквивалентной схемы ТОУ-110 варьировались в следующих пределах (рис. 2): для шунтирующего резистора $R_2 = 2, 4, 6, 8, 10$ Ом, $L_2 = 12, 24, 36, 48, 60$ мкГн; для реактора $L_3 = 5, 10, 15, 20, 25$ мГн.

Глубина токоограничения определялась как отношение максимума тока в режиме КЗ при отсутствии токоограничения (рис. 3, кривая 2) и максимума тока при нормальном режиме работы ТОУ-110 (рис. 3 кривая 3). Результат параметрического анализа представлен на рис. 4.

Как видно, глубина токоограничения существенно зависит от индуктивности реактора при сопротивлениях шунтирующего резистора от 6 Ом и выше, что определяет минимальное значение сопротивления резистора для эффективного токоограничения. Значение индуктивности токоограничивающего реактора должно выбираться с учетом массогабаритных и технико-экономических критериев и, по-видимому, после определения сопротивления шунтирующего резистора. Отдельно необходимо рассмотреть влияние параметров схемы на уровень перенапряжений, возникающих при работе ТОУ-110 (рис. 5).

Параметрический анализ показывает, что во всем выбранном диапазоне параметров ТОУ-110 уровень перенапряжений находится на приемлемом уровне (до 80 кВ, рис. 5) при рабочем напряжении фаза–ноль 63,5 кВ. Тот факт, что взрывной размыкатель способен выдержать до 70 кВ на единственный разрыв, а таких разрывов в рассматриваемом устройстве пять, обеспечивает существенный запас электрической прочности системы на стадии токоограничения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шульгинов Н., Кучеров Ю., Чемоданов В., Утц Н., Ярош Д. Перспективы развития высоковольтных сетей на примере Московского региона. — Электроэнергия. Передача и распределение, 2011, № 6, с. 66–76.

2. Ивакин В.Н., Ковалев В.Д. Применение токоограничивающих устройств в высоковольтных электрических сетях. — Электро, 2009, № 2, с. 7—14.

3. Шурупов А.В., Козлов А.В., Фортвов В.Е., Бердников Р.Н., Шакарян Ю.Г., Сон Э.Е. Токоограничители на основе быстродействующих коммутаторов. — Энергия единой сети, 2013, № 2, с. 54—66.

4. Патент на полезную модель RU111343U1 (25.08.2011). Малоиндуктивный резистор для гашения коммутационных перенапряжений / А.В. Шурупов., А.В. Козлов, А.Н. Гусев, Р.Н. Бердников, В.Е. Фортвов, А.Н. Чулков, Э.Е. Сон, Ю.А. Горюшин, Ю.А. Деметьев.

5. Хайнеман Р. Визуальное моделирование электронных схем в PSPICE / Пер. с нем. — М.: ДМК Пресс, 2008, 336 с.

[07.12.2015]

Авторы: Шурупов Михаил Алексеевич окончил Московский физико-технический институт (государственный университет) — МФТИ (ГУ) в 2010 г. Кандидатскую диссертацию «Исследование распро-

Elektrichestvo (Electricity), 2017, No. 1, pp. 29—34.

странения, локализации и распада импульсного субмикросекундного разряда в неоднородных средах и высокоскоростных газовых потоках» защитил в 2013 г. Научный сотрудник Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН).

Шурупов Алексей Васильевич окончил МФТИ в 1980 г. Кандидатскую диссертацию «Физика и химия плазмы» защитил в 1985 г. Директор Шатурского филиала (ШФ) ОИВТ РАН.

Козлов Алексей Александрович окончил Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» в 2011 г. Младший научный сотрудник ШФ ОИВТ РАН.

Котов Андрей Владимирович окончил в 2011 г. Московский государственный открытый универси-

Application of Explosion Technologies for Constructing a Compact 110 kV Current Limiting Device

SHURUPOV Mikhail Alekseyevich (Unified Institute of High Temperature of Russian Academy of Sciences (UIHT RAS), Moscow, Russia) — Scientific researcher, Cand. Sci. (Fiz. and Math.)

SHURUPOV Aleksei Vasil'yevich (Shatura Branch (ShB) UIHT RAS, Moscow oblast, Russia) — Director, Cand. Sci. (Fiz. and Math.)

KOZLOV Aleksei Aleksandrovich (ShB UIHT RAS, Moscow oblast, Russia) — Junior scientific researcher

KOTOV Angrei Vladimirovich (ShB UIHT RAS, Moscow oblast, Russia) — Junior scientific researcher

The article considers the possibility of constructing a high-speed current limiting device of the 110 kV voltage class based on new physical principles, namely, using explosion-type switches. The time taken for the device to change to the current limiting mode is 2 ms, which is consistent with the characteristics of new-generation devices. An equivalent circuit of the developed device is suggested, and its parametric analysis is carried out, which demonstrated good prospects of the developed circuit as a new-generation current limiting device, which may become in the future one of key components ensuring power network safety. The considered current limiting device is able to disconnect the network in the first half-cycle after the short-circuit fault onset moment while ensuring an essential degree of current limitation and a moderate level of overvoltage. Further experimental investigations of the proposed circuit seem to be of practical interest.

Key words: current limiting devices, explosion-type high-voltage switching device, fusible switching element, noninductive resistor, short-circuit fault

REFERENCES

1. Shul'ginov N., Kucherov Yu., Chemodanov V., Utts N., Yarosh D. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredeleniye* — in Russ. (Electric energy. Transmission and distribution), 2011, No. 6, pp. 66—76.

2. Ivakin V.N., Kovalev V.D. *Elektro* — in Russ. (Electro), 2009, No. 2, pp. 7—14.

3. Shurupov A.V., Kozlov A.V., Fortov V.Ye., Berdnikov R.N., Shakaryan Yu.G., Son E.Ye. *Energiya yedinoi seti* — in Russ. (Energy of a uniform network), 2013, No. 2, pp. 54—66.

4. Патент на полезную модель (Utility patent) RU 111343U (25.08.1011). Малоиндуктивный резистор для гашения коммутационных перенапряжений (Low-inductance resistor for damping switching overvoltage)/A.V. Shurupov, A.V. Kozlov, A.N. Gusev, R.N. Berdnikov, V.Ye. Fortov, A.N. Chulkov, E.Ye. Son, Yu.A. Goryushin, Yu.A. Dement'yev.

5. Khaineman R. *Vizual'noye modelirovaniye elektronnykh skhem v PSPICE /Per. s nem.* (Visual modeling of electronic circuits in PSPICE/Transl. from German). Moscow, DМК Press, 2008, 336 p.