
Исследования и разработки для повышения безопасности электроэнергетики

**ШУРУПОВ АЛЕКСЕЙ ВАСИЛЬЕВИЧ,
ДИРЕКТОР ШФ ОИВТ РАН**

Содержание

1 Исследования и испытания молниезащиты электроэнергетических объектов

2 Совершенствование взрывобезопасности и взрывозащищенности высоковольтного маслонаполненного электротехнического оборудования ПАО «ФСК ЕЭС»

3 Быстродействующая защита от токов короткого замыкания в высоковольтных сетях и в генерации. Токоограничивающие выключатели на основе устройств расцепления взрывчатых (взрывных коммутаторов)

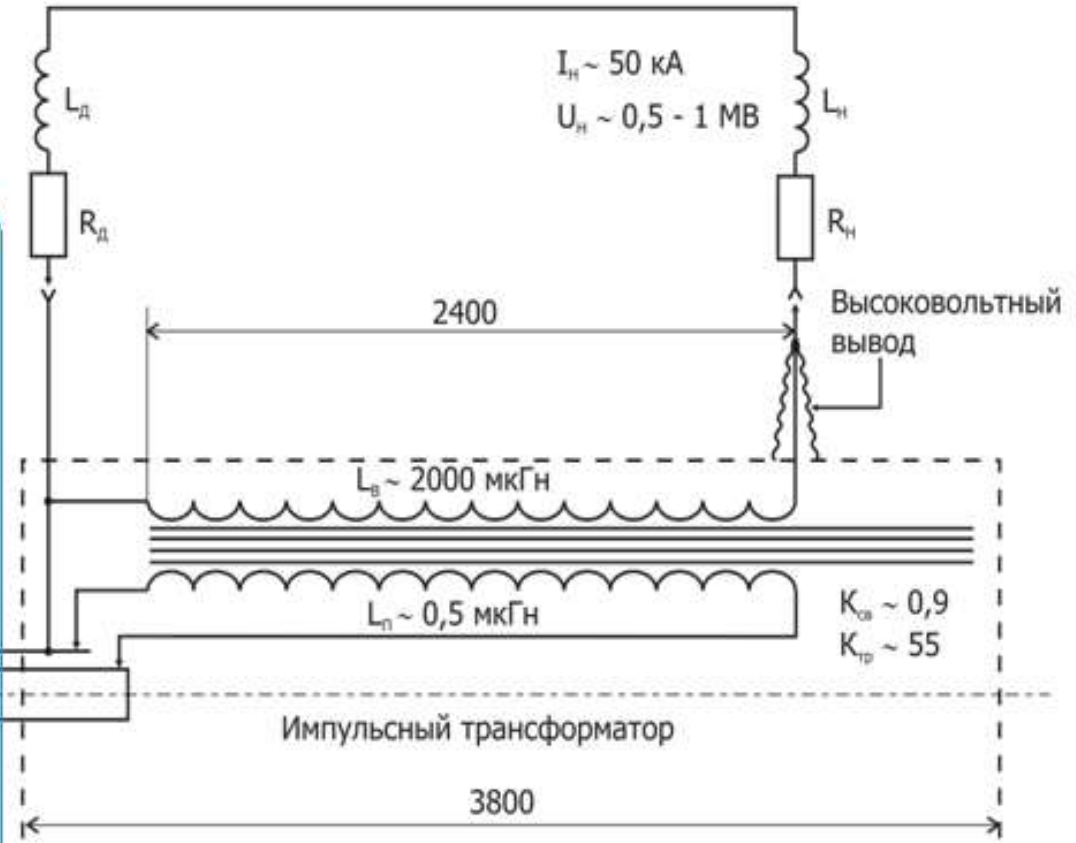
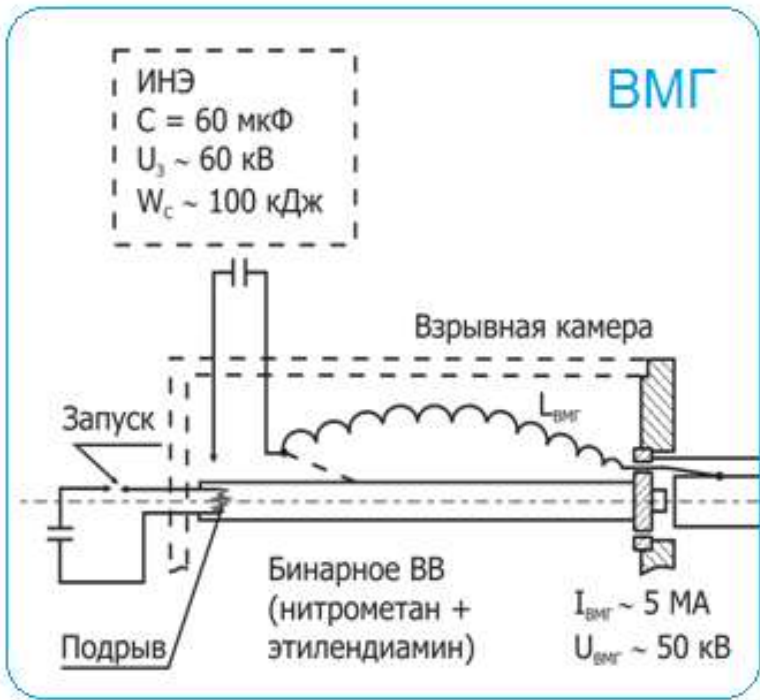
**Мобильный испытательный
комплекс на основе
взрывомагнитных генераторов для
испытания объектов
электроэнергетики на
молниестойкость (МИК ВМГ)**

Задачи, решаемые с помощью МИК ВМГ:

- Полномасштабные испытания объектов электроэнергетики по отношению к мощному импульсному воздействию для построения систем молниезащиты с целью проверки:
 - Заземлителей электрических подстанций (ПС);
 - Оборудования ПС на электромагнитную устойчивость к воздействию разрядов молнии и к наведенным токам во вторичных цепях управления;
- Сбор данных об импульсных характеристиках грунтов;
- Исследование нелинейных процессов распространения искровых каналов пробоя на поверхности грунта.

Электрическая схема МИК ВМГ

Образец ВМГ



Импульсный трансформатор и взрывная камера



Взрывная камера

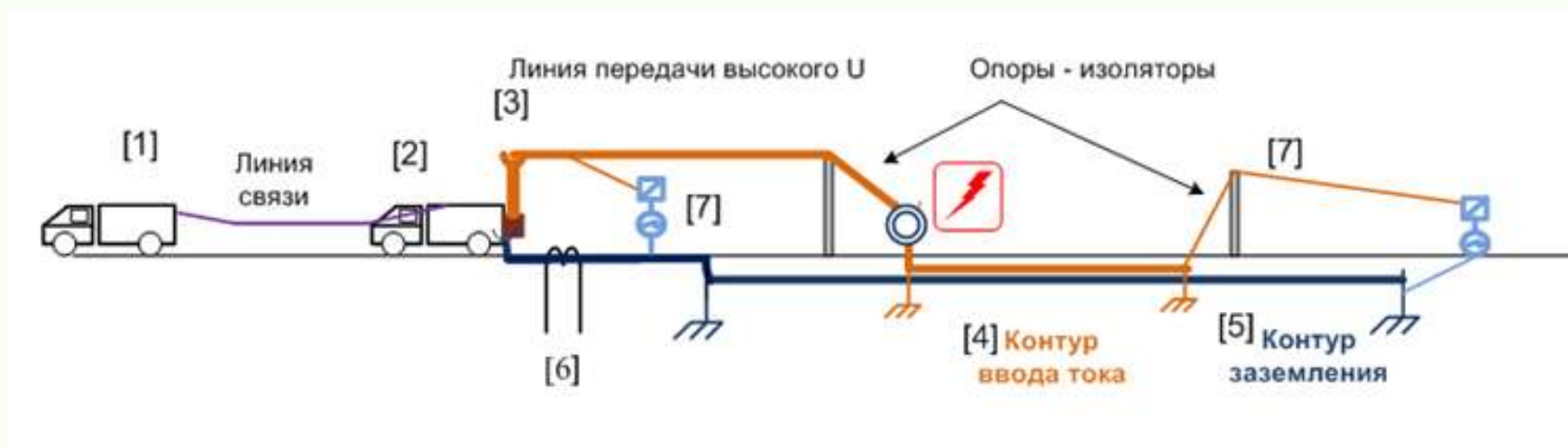
Повышающий импульсный трансформатор

Проходной изолятор

Максимальная энергия электромагнитного импульса	2 МДж
Максимальное напряжение на первичной обмотке	100 кВ
Максимальное напряжение на вторичной обмотке	1500 кВ
Время нарастания импульса тока	20 мкс
Максимальный ток первичной обмотки	5000 кА
Максимальный ток вторичной обмотки	100 кА
Внешний диаметр	1240 мм
Длина трансформатора	3800 мм
Масса трансформатора	4300 кг

Максимальный вес заряда ВМГ в тротиловом эквиваленте (нитрометан + этилендиамин), кг	5
Число взрывов разрешенного веса заряда	200
Габариты, мм	3100 × 730 × 1600

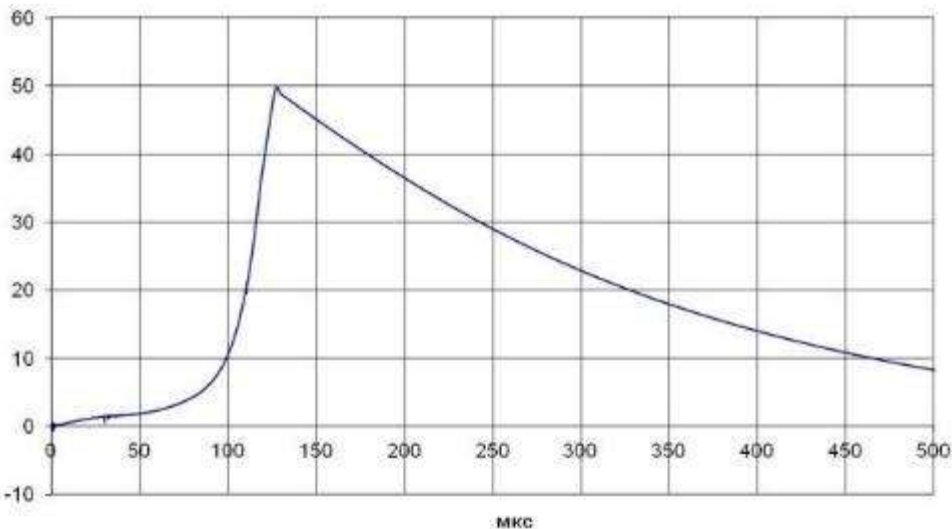
Экспедиция МИК ВМГ по испытанию грунтов в Московской области (с. Дмитровский Погост)



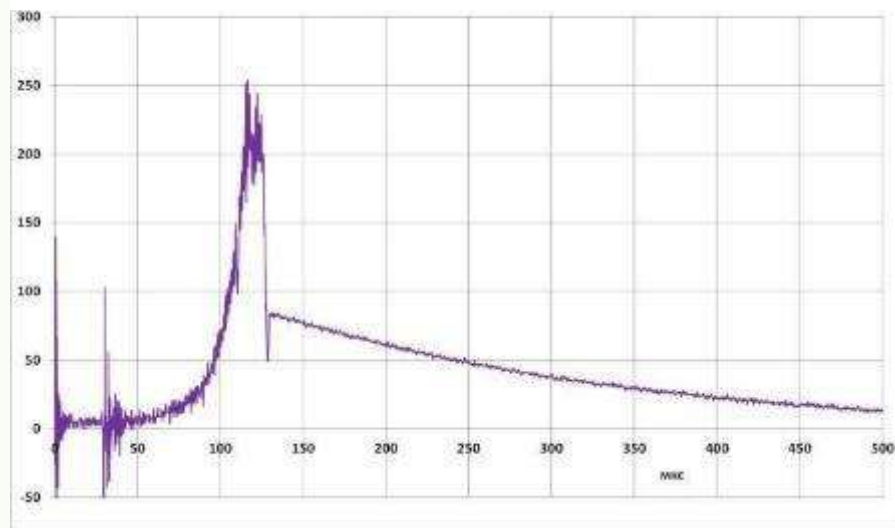
[3], [7] – делители напряжения
[6] – пояс Роговского

Результаты работы МИК ВМГ

Ток в нагрузке, кА



Напряжение на нагрузке, кВ



Сопротивление контура

$$R_3 = 4 \text{ Ом}$$

Энергия емкостного накопителя

$$W_3 = 23,5 \text{ кДж}$$

Энергия, генерированная ВМГ

$$W_{Г} = 800 \pm 40 \text{ кДж}$$

Энергия, выделившаяся в резистивной нагрузке заземления

$$W_{Н} = 480 \pm 20 \text{ кДж}$$

Работа МИК ВМГ на высокоомные нагрузки

Генератор токов молнии с трансформаторным выходом на нагрузку

Высоковольтный выход с делителем напряжения ДН1

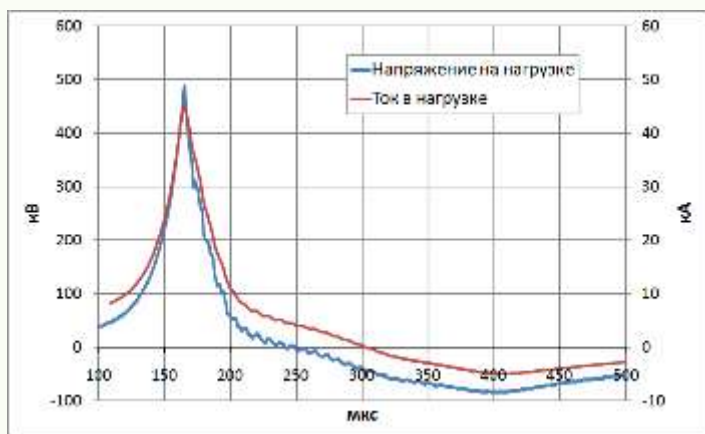
Система управления

Линия передачи тока

Активная модельная нагрузка с делителем напряжения ДН2



МИК ВМГ на площадке ШФ ОИВТ РАН, октябрь 2017,
Сопrotивление активной нагрузки - 10 Ом, индуктивность контура - 150 мкГн



Выходные параметры

Максимальная амплитуда тока ВМГ	5 МА
Амплитуда тока в нагрузке	45 кА
Энергия МИК ВМГ	1680 кДж
Энергия в активной нагрузке	500 кДж
Напряжение на выходе МИК ВМГ	820 кВ
Напряжение на нагрузке	510 кВ
Длительность тока в нагрузке по ур. 0,5	50 мкс

Датчики тока молнии

(разработаны совместно с АО «СЭТ»)

Назначение Измерение тока молнии, проходящего через опоры линий электропередачи или молниеприёмники систем защиты подстанций, при попадании в них разряда молнии

Основные характеристики

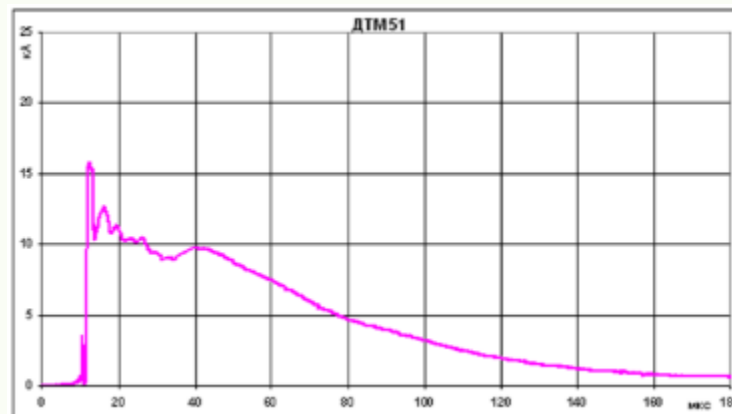
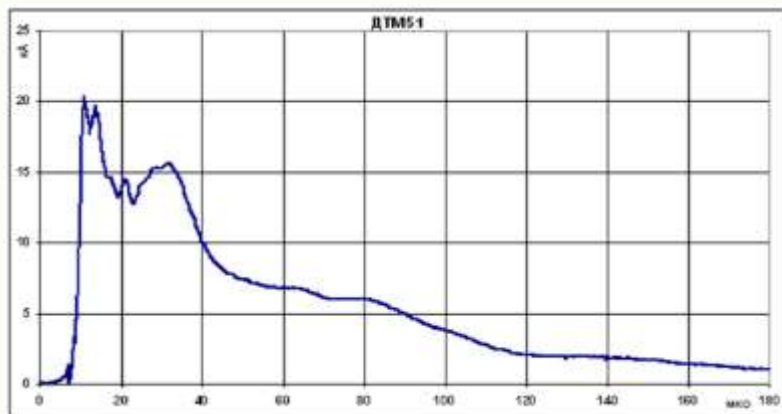
Запись осциллограмм тока отдельных компонент разрядов молний	
Диапазон регистрируемых амплитуд тока молнии	1-70 кА
Максимальное количество регистрируемых разрядов молнии (включая многокомпонентные)	32
Максимальное количество компонент отдельных разрядов молнии	10
Частота оцифровки данных тока молнии	10 МГц
Длительность записи тока отдельных компонент разрядов молний	1000 мкс
Автономный ресурс работы (АРР) без замены источников питания, не менее	3 года
Фиксация времени и даты разряда молнии за период АРР с точностью, не более	1 мин



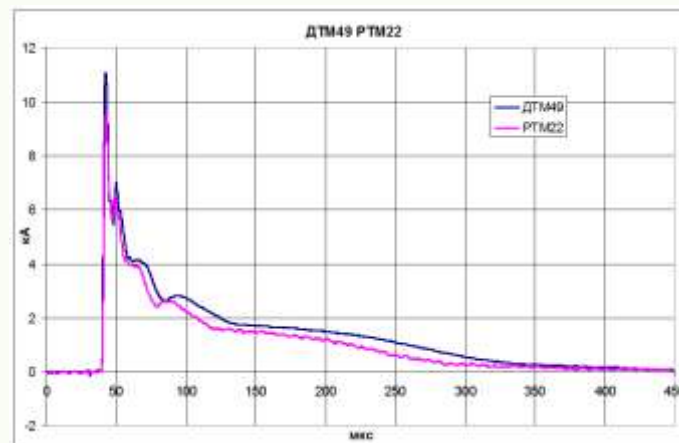
Вариант установки датчика на опоре ЛЭП

Пример регистрации тока молнии

Осциллограммы токов двухкомпонентной молнии
(временной сдвиг между компонентами 46 мс)



Осциллограммы токов, зарегистрированные ДТМ, установленными на соседних опорах (совмещены по фронту тока)



Опытная эксплуатация

МЭС Юга (ДТМ1, ДТМ2, 120 шт.) - 3 сезона,

МЭС Волги (ДТМ3, 40 шт.) - 2 сезона,

ПАО «Белгородэнерго»

(ДТМ-40-70, 10 шт.) – 2 сезона

Совершенствование взрывобезопасности и взрывозащищенности высоковольтного маслонаполненного электротехнического оборудования ПАО «ФСК ЕЭС»

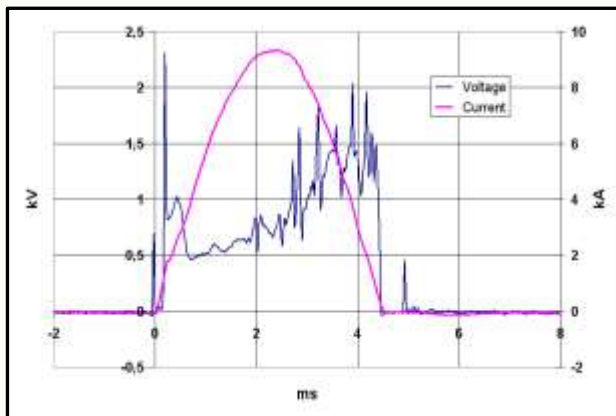
Разработка бездугового источника импульсного давления

Испытания ВМЭО на взрывобезопасность

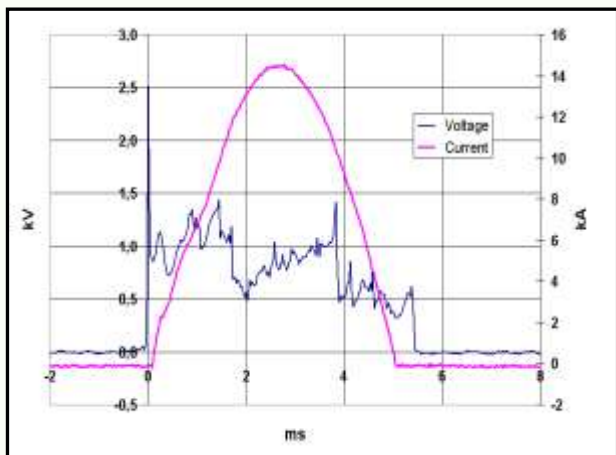
Разработка динамической защиты ВМЭО

Исследование дугового разряда

Сравнение характеристик дугового разряда в трансформаторном масле и в воде

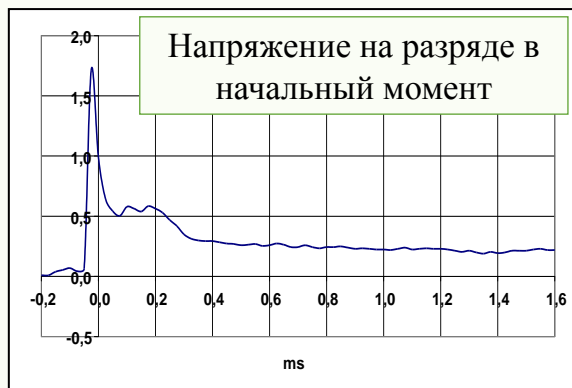
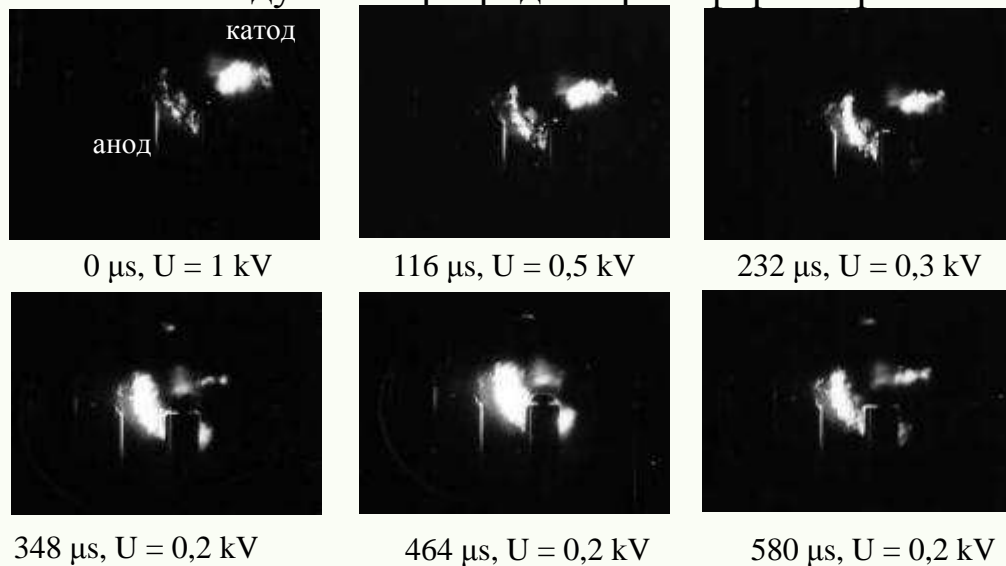


Разряд в трансформаторном масле



Разряд в воде

Развитие дугового разряда в трансформаторном



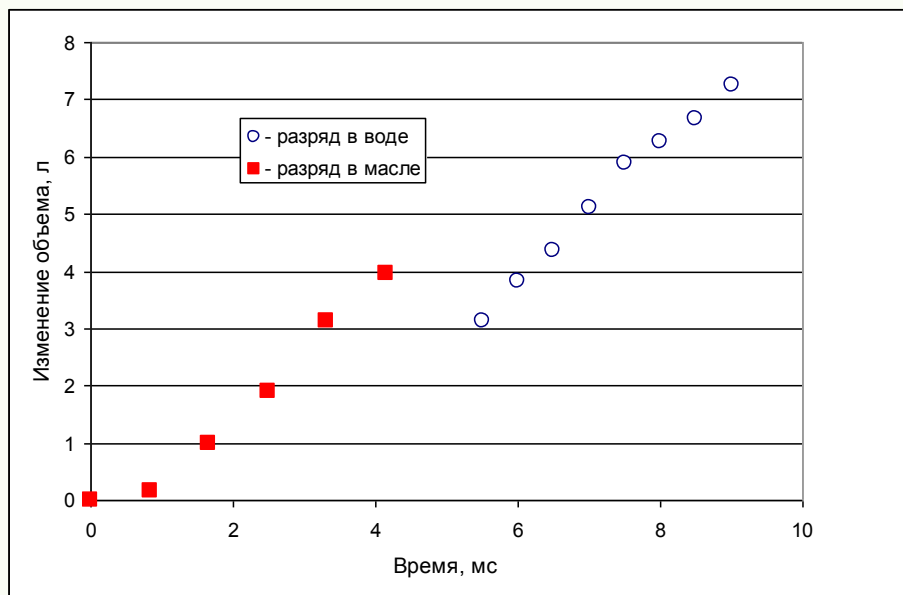
Напряжение на разряде в начальный момент

Скорость распространения фронта свечения плазмы:
0,1-0,3 км/с

Движение жидкости под действием дугового разряда



Граница раздела «масло – азот», энергия дуги- 40 кДж



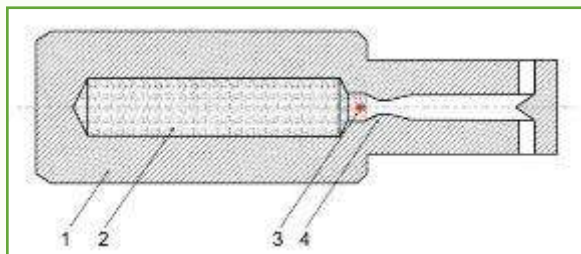
Изменение объема газа со временем

Скорость движения границы – 10 -20 м/с, что соответствует давлению в парогазовом пузыре порядка 10 МПа

Бездуговой источник импульсного давления

Патент «Источник импульсного давления для испытания высоковольтного маслонаполненного оборудования на взрывобезопасность» №103184 от 27.03.20011 г.

Патентообладатели: ОАО «ФСК ЕЭС», ОИВТ РАН



Принципиальная схема БИИД

1 – камера высокого давления, 2 – пороховой заряд, 3 – точка инициирования, 4 – сопло



Тестирование БИИД:

проверка макета системы защиты высоковольтного маслонаполненного электротехнического оборудования

Бездуговой источник импульсного давления может быть использован для:

- проведения испытаний серийных образцов ВМЭО;
- проверки эффективности работы взрывозащитных систем и устройств;
- проработки новых конструкций ВМЭО, имеющих более высокий уровень взрывобезопасности;
- получения необходимых данных для разработки и верификации численных методов расчета перспективных конструкций ВМЭО и систем защиты от взрыва



Испытания электрооборудования на взрывобезопасность при помощи БИИД



**Трансформатор тока
типа ТФРМ 330 кВ**



**Трансформатор
тока типа
ТОМ-110**



**Трансформатор
напряжения типа
НКФ-110 кВ**

Система динамической защиты на примере автотрансформатора IV габарита

Предназначение

Защита корпуса маслонаполненного электротехнического оборудования от разрушения при возникновении дугового разряда после внутреннего короткого замыкания

Вариант 1 (СДЗ-1)

Диаметр, мм	1056
Присоединительный диаметр, мм	1120
Высота, мм	595
Масса, кг	80



Вариант 2 (СДЗ-2)

Ширина, мм	1170
Длина, мм	1570
Высота, мм	470
Масса, кг	160



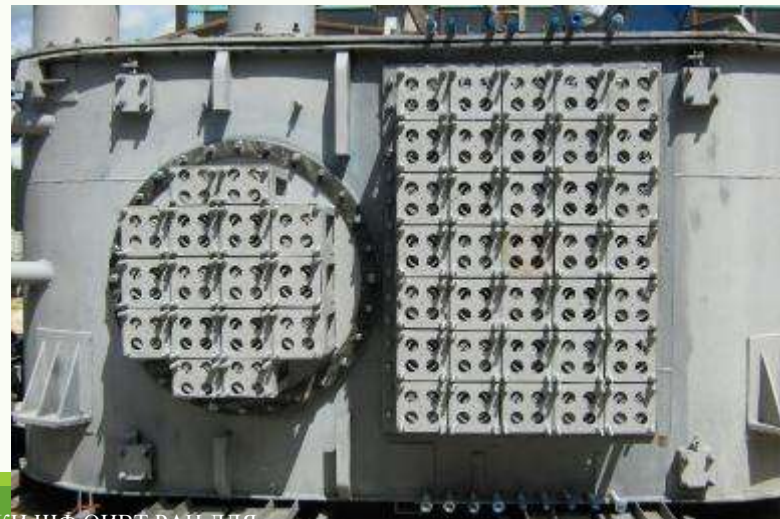
Вариант 3 (СДЗ-3)

Диаметр внутренний, мм	390
Диаметр наружный, мм	600
Высота, мм	410
Масса, кг	50



Токоввод с установленной системой динамической защиты

СДЗ-1 и СДЗ-2 без крышек, установленные на корпус автотрансформатора IV габарита



Эксперимент по проверке эффективности системы динамической защиты



Датчики Д1-Д4 измеряли давление в жидкости внутри макета автотрансформатора, датчик Д5 измерял давление в защитном кожухе, закрывающем макет СДЗ № 2.

Расстояние от датчиков Д1 и Д2 до места воздействия БИИД составляет 1,7 м и 1,4 м соответственно, кратчайшее расстояние по жидкости для датчиков Д3 и Д4, установленных на противоположной стороне, составляет 2,3 и 2 м.

Разработка прибора непрерывного контроля влажности бумажно-масляной изоляции

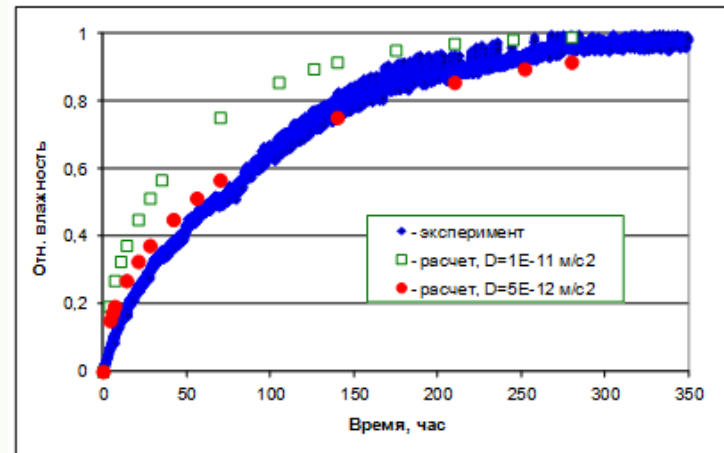
Считается недопустимой эксплуатация маслonaполненного электрооборудования при влажности бумажно-масляной изоляции (БМИ) свыше 2%, при этом отсутствуют методы непрерывного контроля влажности БМИ, а определение этой величины пересчетом из влажности трансформаторного масла может приводить к большой погрешности.

В ШФ ОИВТ РАН по заказу ПАО «ТЮМЕНЬЭНЕРГО» разработан прибор непрерывного контроля влажности (ПНКВ) БМИ, основанный на зависимости диэлектрической проницаемости БМИ от влажности (диэлькометрический метод).

Стенды для исследования процессов переноса влаги в БМИ и калибровки датчиков влажности



Калибровка датчика влажности при влажности сенсора 2 %, температура 80 °С



Процесс калибровки датчиков занимал 40-50 дней. Полученные значения коэффициента диффузии влаги близки к ожидаемым.

В настоящее время процессы переноса влаги в БМИ изучены явно недостаточно: по литературным данным коэффициент диффузии зависит от толщины образца (?).

Опытная эксплуатация прибора непрерывного контроля влажности БМИ



1 - датчик влажности, 2 - модуль сопряжения, к которому можно подключать до 16 датчиков влажности.



Датчик влажности и модуль сопряжения на подстанции «Каскара» АО «Тюменьэнерго»

Основные характеристики прибора:

- диапазон измерения влажности (по массе) до 6 %
- погрешность измерения (по массе) 0,4 %
- диапазон температур -40 °С... +90°С
- ресурс работы 80000 часов
- поддерживает протоколы обмена с АСУ верхнего уровня в стандарте МЭК 60870-5-101 и МЭК 60870-5-104



Влагодчувствительный элемент датчика влажности из трансформаторного картона толщиной 0,5 мм
Емкость измеряется с погрешностью 1 фФ (10^{-15} Ф)

Работа была одобрена на заседании НТС ПАО «Россети» . Предложено расширить опытно-промышленную эксплуатацию на большем количестве объектов.

Датчики влажности БМИ (разработаны совместно с АО «СЭТ»)

Назначение: Непрерывное измерение влажности бумажно-масляной изоляции маслонаполненного электрооборудования (силовые трансформаторы, измерительные трансформаторы)

Область применения: Измерительное устройство цифровой подстанции

Основные характеристики: Диапазон измерения влажности БМИ (по массе) от 0 до 8 %
Основная погрешность измерения влажности (по массе) $\pm 0,4$ %

ДВИМ-2-0-8%



Количество датчиков влажности, подключаемых к одному устройству сопряжения	от 1 до 16
Питание датчика	24 \pm 4 В (от линии связи RS-485)
Потребляемая мощность, не более	10 мВт
Масса, не более	0,2 кг
Размеры	123,5 \times 34 \times 54 мм
Поддерживаемые протоколы обмена	МЭК 60870-5-101 (RS-485)

Автономное питание датчика от встроенного гальванического элемента

ДВИМ-3-0-8%



Время непрерывной работы без замены гальванического элемента, не менее	10 лет
Масса, не более	0,25 кг
Размеры	145 \times 34 \times 54 мм
Обмен с блоком сопряжения в АСУ ТП по волоконно-оптической линии связи	

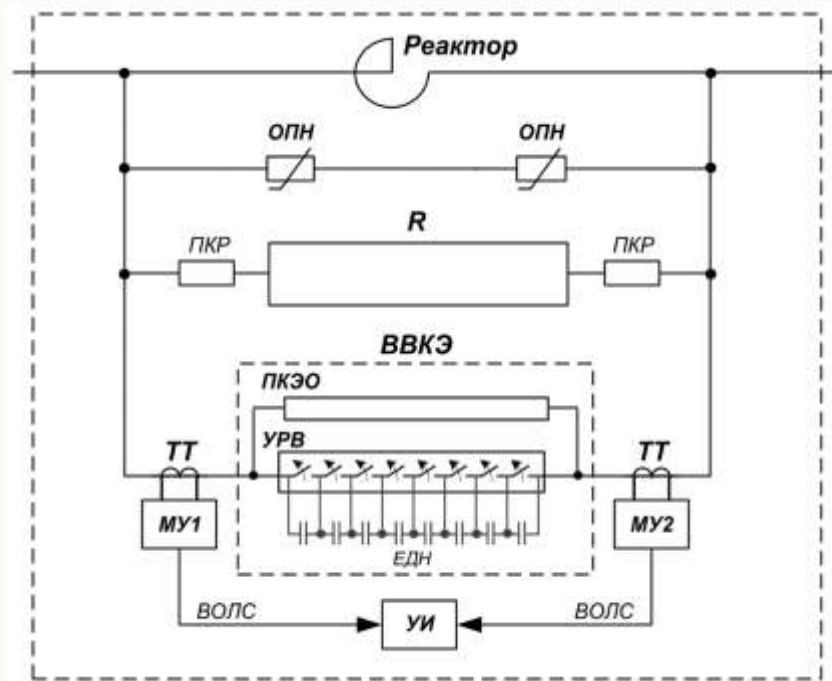
Быстродействующая защита от токов короткого замыкания в высоковольтных сетях и в генерации

ТОКООГРАНИЧИВАЮЩИЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ НА ОСНОВЕ УСТРОЙСТВ РАСЦЕПЛЕНИЯ ВЗРЫВЧАТЫХ (ВЗРЫВНЫХ КОММУТАТОРОВ)

Токоограничивающее устройство на напряжение 220 кВ (ТОУ-220) / Заказчик ПАО «ФСК ЕЭС»



Модернизированное устройство ТОУ-220
(в однофазном исполнении без реактора)
с общим модулем устройства интеграции



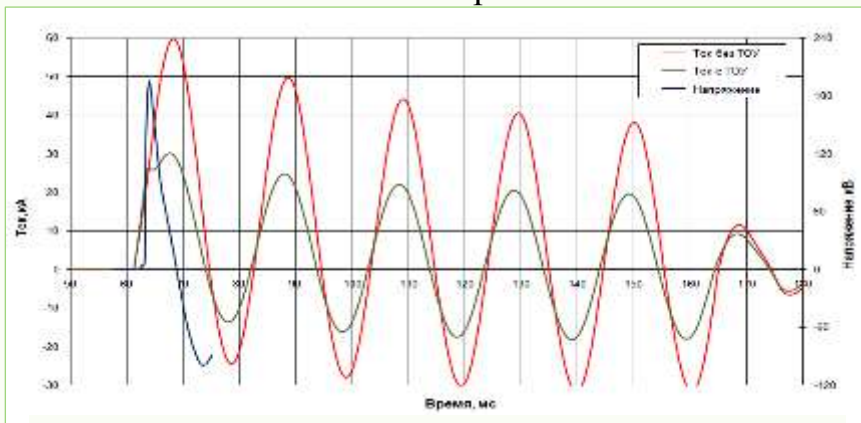
Состав:

1. Устройство расцепления взрывчатое (УРВ)
2. Плавкий коммутационный элемент (ПКЭО)
3. Емкостной делитель (ЕДН)
4. Безындукционный резистор (R)
5. Плавкие коммутаторы (ПКР)
6. Трансформаторы тока (ТТ)
7. Модули управления цикла «Отключения» (МУ1 и МУ2)
8. Устройство интеграции с общим модулем (УИ)
9. Волоконно-оптическая линия связи (ВОЛС)
10. Снижение (на схеме не показано)

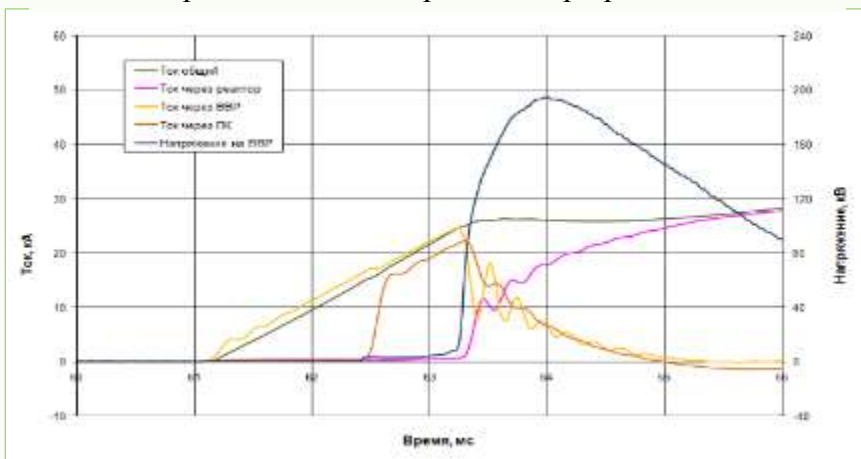
Испытания ТОУ-220

в Центре по испытаниям и сертификации АО «НТЦ ФСК ЕЭС»

Задача испытаний: проверка ТОУ-220 на соответствие параметров техническим требованиям



Осциллограммы тока и напряжения при работе ТОУ-220



в ФГУП «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»

Задача испытаний: экспериментальная проверка на стенде ГНЦ РФ ТРИНИТИ опытного образца ТОУ-220 на предельное напряжение после срабатывания



Подтверждены характеристики специального реактора и заданным требованиям высоковольтного взрывного коммутационного элемента ТОУ-220

Испытания подтвердили функционал работы ТОУ-220 и соответствие его параметров требованиям ПС 500 кВ «Каскадная»

ТОУ-220 на ПС 500 кВ «Каскадная» МЭС «Центра» филиала ПАО «ФСК ЕЭС»

ПС «Каскадная» располагается в промышленной зоне Руднево, Косино-Ухтомского района Москвы и входит в состав Московского энергетического кольца 500 кВ,



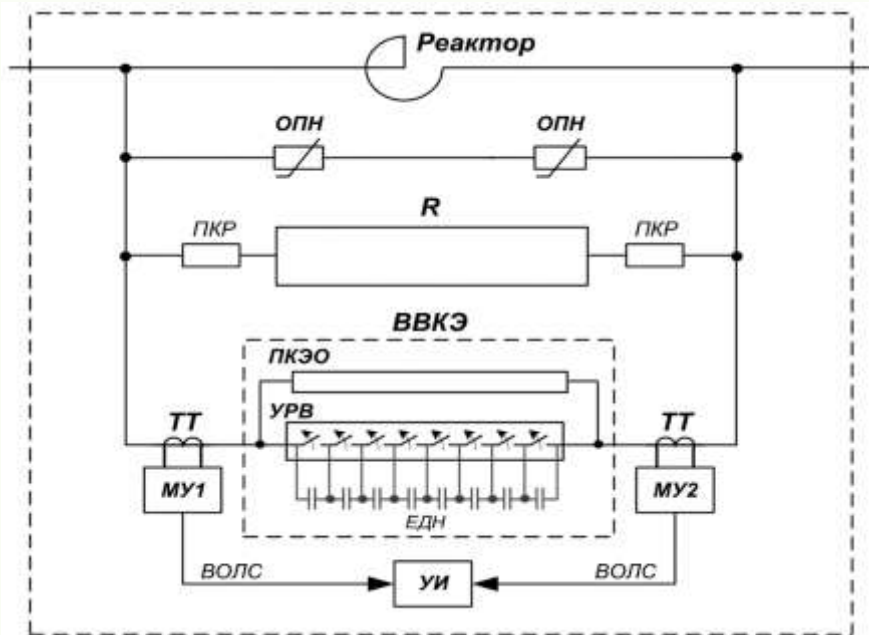
Фаза «С» ТОУ-220



ТОУ-220 на
ПС 500 кВ «Каскадная»
общий вид

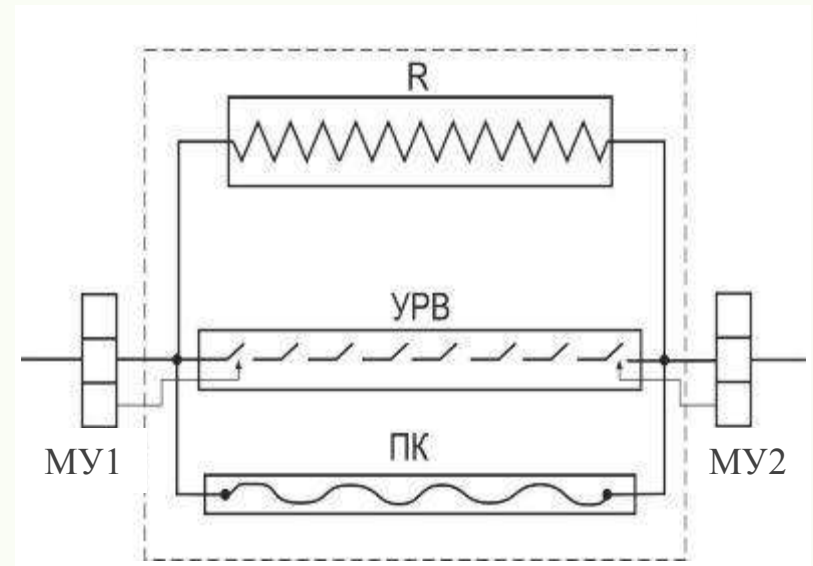
Токоограничивающий выключатель (ТОВ) для сетей напряжением 10 - 220 кВ

ТОУ-220



1. Устройство расцепления взрывчатое (УРВ)
2. Плавкий коммутационный элемент (ПКЭО)
3. Емкостной делитель (ЕДН)
4. Безындукционный резистор (R)
5. Плавкие коммутаторы (ПКР)
6. Трансформаторы тока (ТТ)
7. Модули управления цикла «Отключения» (МУ1 и МУ2)
8. Устройство интеграции с общим модулем (УИ)
9. Волоконно-оптическая линия связи (ВОЛС)

ТОВ



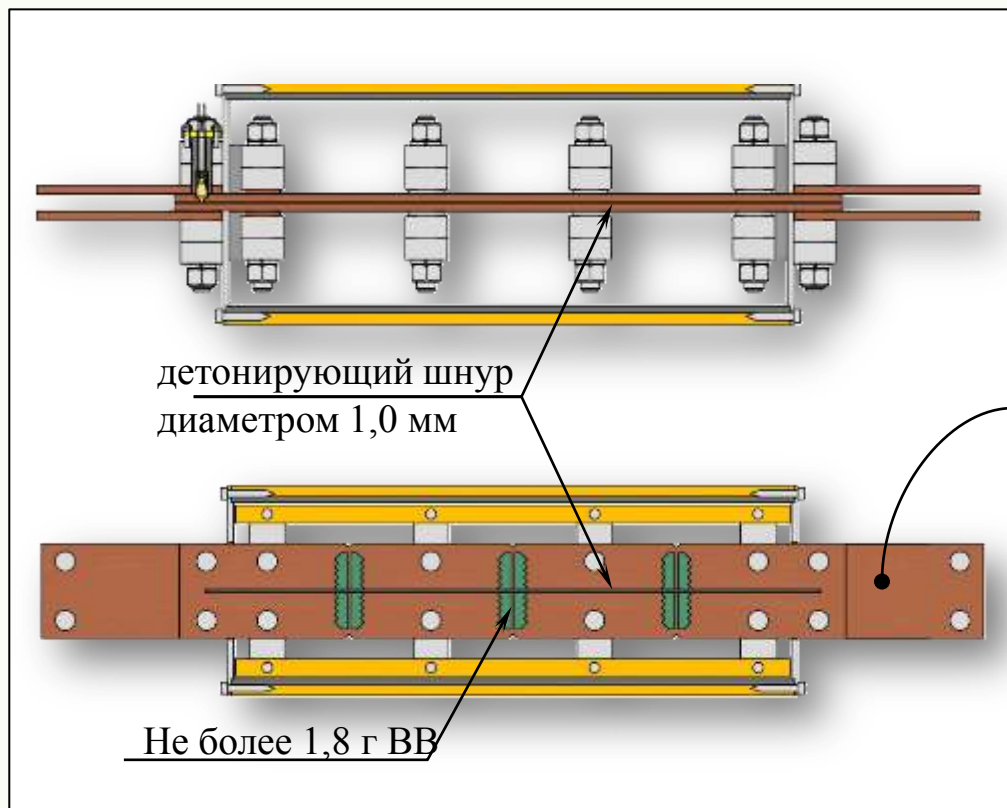
Основные элементы ТОВ:

- УРВ – устройство расцепления взрывчатое
- МУ1, МУ2 – модули управления
- ПК – плавкий коммутатор
- R – токоограничивающий «горячий» резистор

Разрушаемый токопровод УРВ для ТОВ

Основным элементом ТОВ является устройство расцепления взрывчатое (УРВ)
Принцип работы УРВ основан на механическом разрушении токовой шины энергией взрывчатого вещества (ВВ) за время менее 1 мс

Один из вариантов исполнения токопровода УРВ для ТОВ



Элемент токопровода после срабатывания

Общее содержание ВВ в токопроводах ТОВ различных модификаций – не более 18 г

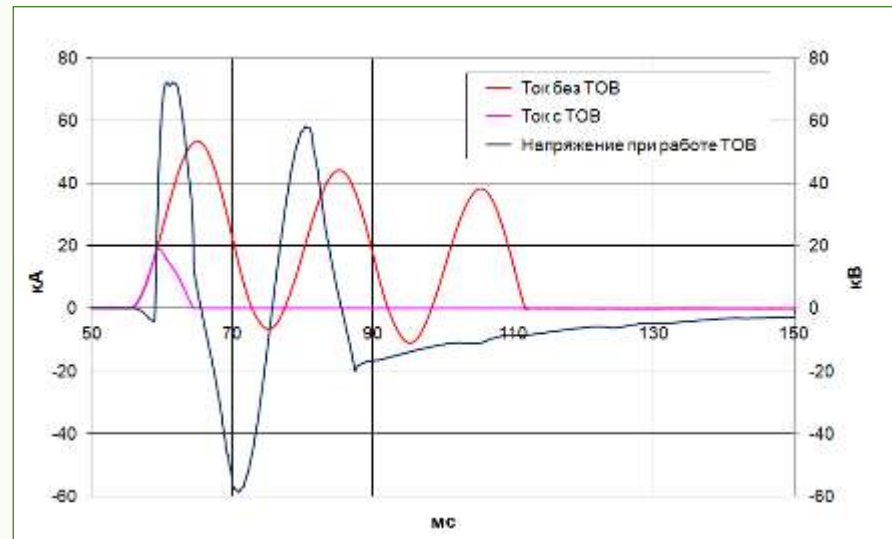
Токоограничивающий выключатель ТОВ-110



Испытания опытного образца ТОВ-45 в Центре по испытаниям и сертификации АО «НТЦ ФСК ЕЭС»




При испытаниях моделировалась сеть с полной аperiodической составляющей:

- ▶ действующее напряжение: 45 кВ
- ▶ максимальная амплитуда тока: 53 кА

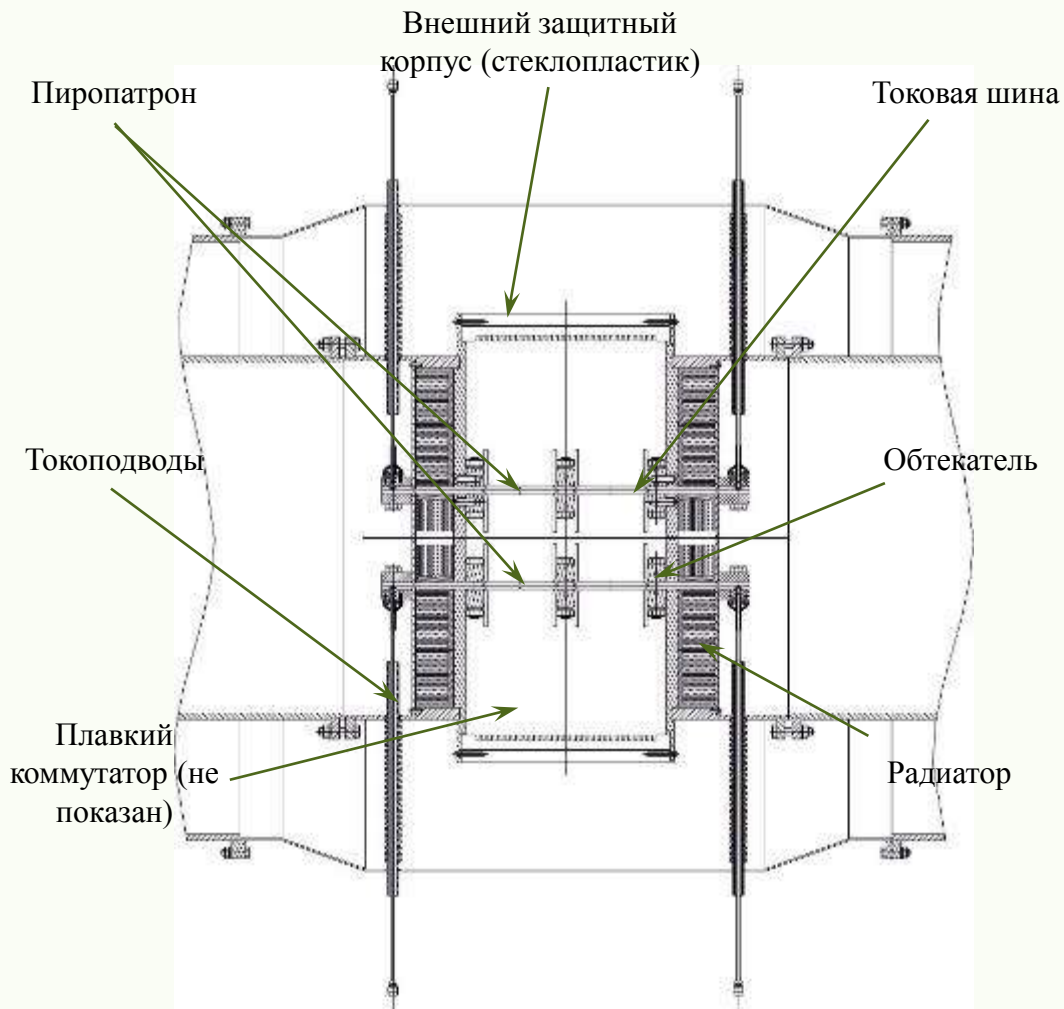


Испытания опытного образца ТОВ подтвердили правильность идей, конструкторских разработок и возможности создания ТОВ с необходимыми параметрами

Типы (варианты исполнения) ТОВ

Класс напряжения, кВ	3-6	10-20	35	110	220
Внешний вид					
Рабочий ток, кА	0,6 - 1,2	0,6 – 4,0	0,6 - 2,4	1,2 - 2,4	1 - 2,0
Ток откл., кА	2 - 10	2 - 20	2 - 20	3 - 20	5 - 15
Сечение шины	до 400 мм ²	до 600 мм ²	до 1600 мм ²	до 1600 мм ²	до 1200 мм ²
Масса ВВ, г	не более 5 г	не более 6 г	не более 8 г	не более 12 г	не более 18 г
Размеры, м	0,25×0,3	0,4×0,40	0,5×1,2	0,7×2	0,7×3,2
Масса(фаза),кг	12	20	60	800	1400

Токоограничивающий выключатель генератора (ТОВГ), (1300 МВт, 24 кВ, 37 кА) для ГК «Росэнергоатом»



Диаметр корпуса 800 мм, высота корпуса 220 мм

Устройство расцепления взрывчатое для ТОВГ 1300 МВт



До срабатывания



После срабатывания
за время 0,7 мс
Масса ВВ = 14 г

Сечение токовой шины

$$((6\text{мм} \times 600\text{мм}) \times 2) \times 2 = 14400 \text{ мм}^2$$

Установка для испытаний ТОВ

Установка предназначена для заводских испытаний ТОВ 6-110 кВ и ТОВг для генераторов до 800 МВт

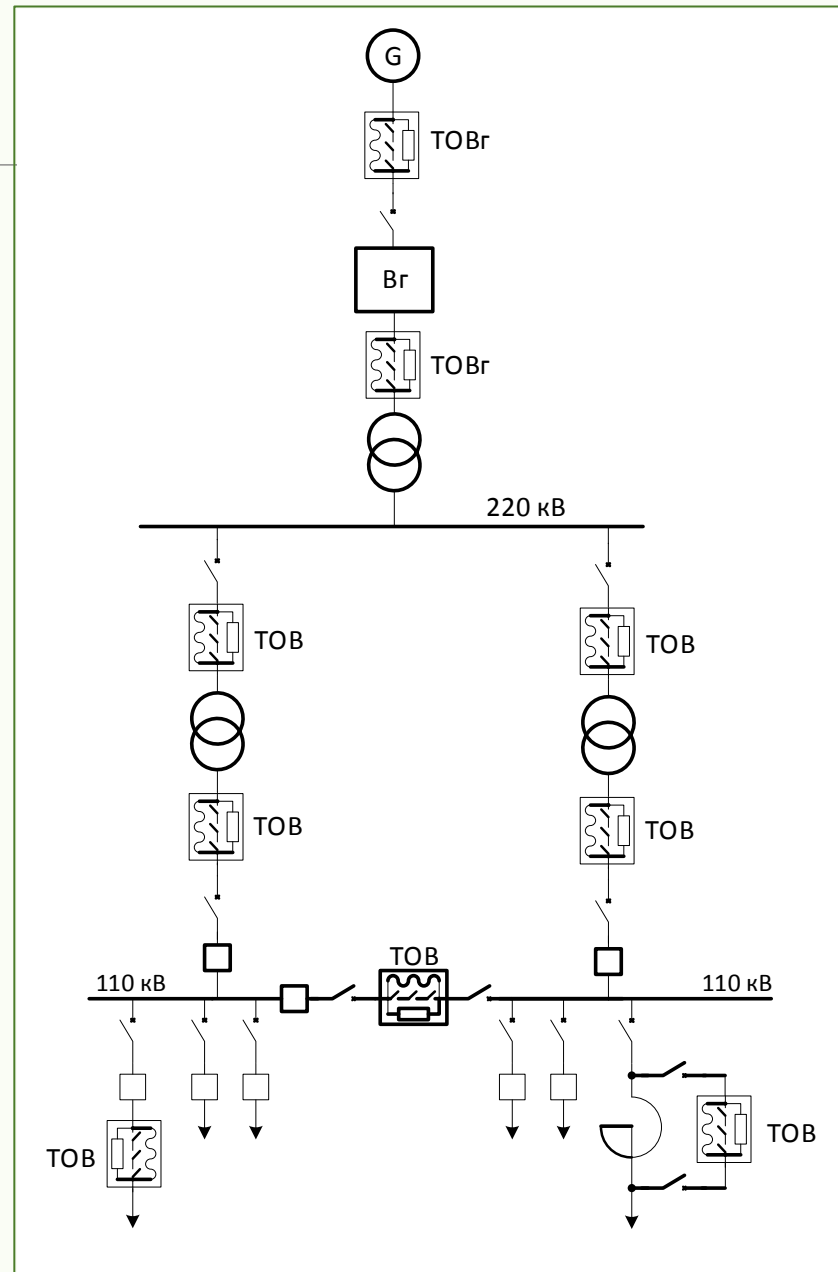
Разработана ШФ ОИВТ РАН, изготовлена АО «СЭТ»



Основные параметры установки:

- ЕН-1 (270 кДж, 25 кВ)
- ЕН-2 (3,6 МДж, 6 кВ)
- Выходной ток в нагрузке (50 Гц) – до 400 кА
- Напряжение на нагрузке (50 Гц) – до 90 кВ

Варианты установки ТОВ и ТОВГ



Концепция

В основе концепции повышения надёжности и конкурентоспособности электроэнергетики РФ лежит принципиально новое устройство быстродействующей защиты от токов короткого замыкания, а именно токоограничивающий выключатель. ТОВ на весь класс напряжений 6 - 500 кВ разработаны отечественными предприятиями на основе отечественных технологий и готовы к практическому применению.

Функционально ТОВ ограничивает ток КЗ до безопасного значения и полностью отключает фазу в которой возник ТКЗ. Это устройство с принципиально новым функционалом, который позволит обеспечить следующие технические преимущества:

- отключает ТКЗ за время не более 0,01с;
- исключает воздействие ударных токов на защищаемое оборудование;
- в десятки раз уменьшает энерговыделение в устройствах в которых возник ТКЗ;
- повышает кратно ресурс силовых выключателей 40-63кА;
- снижает требования по току отключения с 63кА до 25 (40) кА;
- исключает повреждение генераторных выключателей всех типов;
- в номинальных режимах практически не имеет тепловыделения;
- исключает перенапряжение при отключении ТКЗ;

Внедрение ТОВ и ТОВг в электроэнергетику **обеспечит**:

- кратное **повышение ресурса** выключателей 25-63 кА на существующих КРУЭ;
- переход при новых КРУЭ и реконструкциях действующих КРУЭ на выключатели отечественного производства с токами отключения **не выше 40 кА**;
- полное **исключение взрывов и пожаров** прежде всего на силовых трансформаторах;
- **защиту генераторов и генераторных выключателей**, в том числе и на атомных станциях от ТКЗ;
- переход на генераторы, рассчитанные на **меньшие ударные токи** при возникновении ТКЗ как в первичной обмотке трансформаторов, так и в цепи вторичной обмотки.

ТОВ компактны, технология производства позволяет производить их на отечественных предприятиях. Стоимость ТОВ не превысит 5% стоимости защищаемого оборудования. Экономический эффект может достигать сотен миллиардов рублей в год. ТОВ имеют значительный экспортный потенциал так как не имеют аналогов на класс напряжений свыше 60 кВ. Компании АВВ и G&W Со внедряют аналоги ТОВ в сетях до 38 кВ.

Широкое внедрение ТОВ полностью соответствует концепции энергобезопасности России утверждённой Президентом РФ, Постановлению Правительства РФ по импортозамещению.

Разработки ШФ ОИВТ РАН (совместно с АО «СЭТ») на международном форуме «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ» 2018 г.



Спасибо за внимание!

Шурупов Алексей Васильевич
Директор ШФ ОИВТ РАН,
помощник директора ОИВТ РАН по
специальным технологиям
тел.: 8 (916) 167 62 51
e-mail: shurupov@fites.ru