



Презентация испытательных центров DNV KEMA DNV KEMA Testing Laboratories

Профессор, доктор Рене Питер Поль Смитс, FIEEE

prof.dr.ir. Rene Peter Paul Smeets, FIEEE

Октябрь 30, 2013

October 30, 2013



Лаборатории больших токов DNV KEMA

DNV KEMA High Power Labs

DNV KEMA, Нидерланды, г. Арнем (1936)

DNV KEMA Arnhem, Netherlands (1936)

8400 МВА (лидирующие мировые позиции)

8400 MVA (largest in world)

ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПЫТЫВАТЬ ОБОРУДОВАНИЕ

до 1150 кВ - 63 кА

testing up to 1100 kV-63 kA

DNV KEMA Powertest, г. Чалфонт, США (1972);

DNV KEMA Powertest, Chalfont, USA (1972)

3250 МВА (крупнейшая испытательная лаборатория в США)

3250 MVA (largest test lab in US)

ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПЫТЫВАТЬ ОБОРУДОВАНИЕ

до 200 кВ – 50 кА

testing up to 200 kV - 50 kA

DNV KEMA ZKU (ZKUŠEBNICTVÍ, a.s.)

Чешская Республика, Прага (1953)

DNV KEMA ZKU, Prague, Czech Rep. (1953)

2 x 2250 МВА

2 x 2250 MVA



DNV KEMA, Нидерланды, г. Арнем

DNV KEMA Arnhem, the Netherlands

Наружная
испытательная
площадка
open-air test site

2-ая
Синтетическая
установка
2nd synthetic installation

Лаборатория
больших токов
high-power labs

Синтетическая установка (720 кВ)
synthetic installation (720 kV)

ВВ лаборатория
high-voltage labs

ОРУ 245 кВ
switchyard (245 kV)

Ударные
генераторы
generator building

Испытательная
лаборатория средних
напряжений (40 кВ)
MV test lab (40 kV)

Причал для
испытаний
трансформаторов
на борту баржи
on-board transformer
testing



Испытываемые компоненты Components to be tested

- **Выключатели**
Circuit breakers
- **Распределительные устройства**
Switchgear
- **Трансформаторы**
Transformers
- **Кабели**
Cables
- **Установочная арматура**
Accessory
- **Изоляторы**
Isolators
- **Ограничители перенапряжений**
Surge arresters
- **Предохранители**
Fuses
- **Шино- и токо- провода**
Busbars
- **Проводники**
Conductors



Содержание презентации Overview of the presentation

- **Воздействующие факторы токов КЗ**
Effects of faults in systems
 - **Электродинамические (силовые)**
Electrodynamically (forces)
 - **Термические (дуговые)**
Thermally (arcs)
- **Воздействия токов КЗ на оборудование**
Impact on equipment
 - **линии электропередач, кабели и кабельная арматура**
overhead line, cables and accessories
 - **распределительные устройства**
switchgear
 - **разъединители**
disconnecter
 - **трансформаторы**
transformer
- **Выключатели, тестируемые в DNV KEMA**
Circuit breaker testing at DNV KEMA
- **Специальные решения по испытаниям в соответствии с требованиями ГОСТ**
special test-strategies for GOST standard
- **Инновации в лабораториях DNV KEMA**
Innovations in DNV KEMA laboratories



Тенденция возрастания токов КЗ Increase of short-circuit current

- Токи КЗ возрастают до уровней пока ещё несуществующих в настоящее время на рынке ограничителей тока

Fault current rises
adequate fault current limiters not yet available

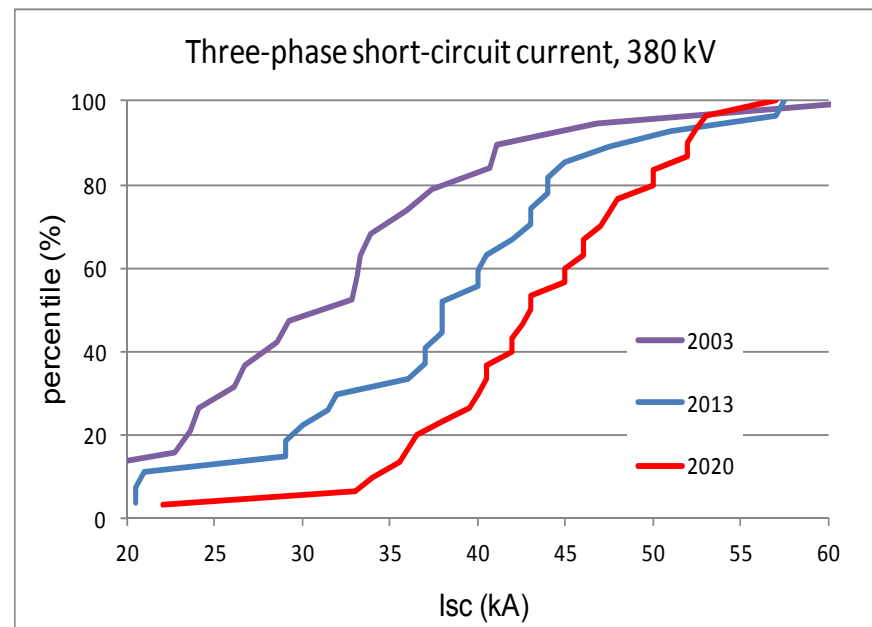
- Концентрация традиционных электростанция на сравнительно небольшой (периферийной) территории

Concentration of conventional power generators in designated (peripheral) locations.

- Увеличение доли местной генерации.

- морские ВЭС

Addition of local generators
- offshore windparks

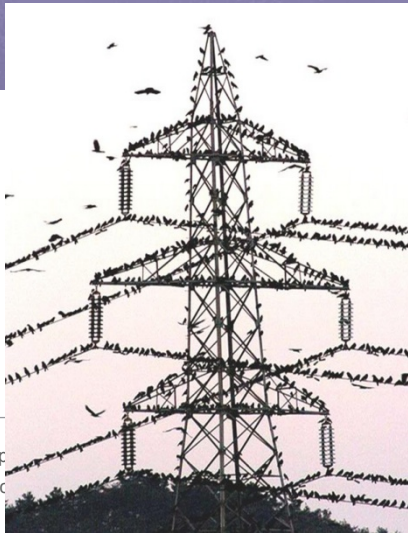


Рост токов КЗ в сети 380 кВ в
Нидерландах в 2003 - 2020

the Netherlands 2003 - 2020

Аварии в системах

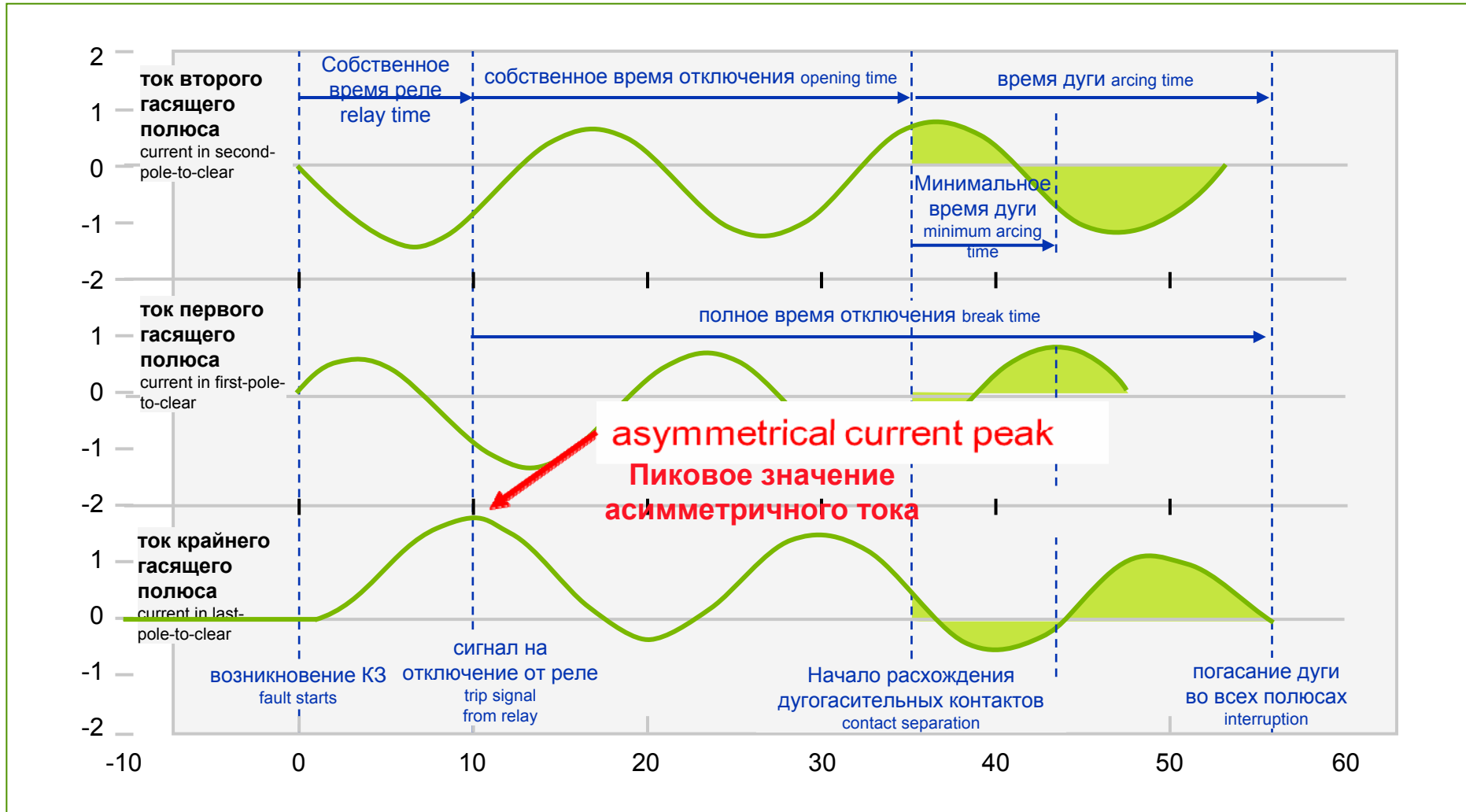
Faults in systems



UP
OC

Последовательность отключения токов КЗ

Fault current interruption sequence

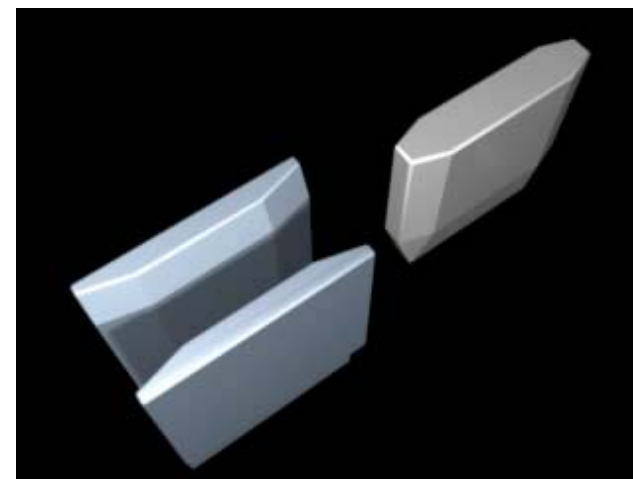
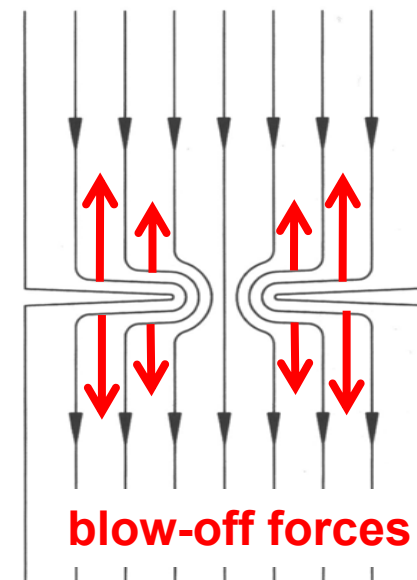


Последствия токов КЗ Consequences of short-circuit current

- **Возникают очень большие электродинамические силы вследствие пикового асимметричного тока КЗ**
Very high electrodynamic forces due to the asymmetrical peak current
 - **Наиболее важным параметром является ударный ток (пиковое значение)**
Peak value is most important
 - **Имеет место воздействие на все компоненты оборудования передачи и распределения электроэнергии**
Acts on all T&D components
- **Термические воздействия**
Thermal effects
 - **Как следствие нагрева проводников**
Due to the heating of conductors
 - **Наиболее важным фактором является длительность**
Duration is most important
 - **Дуга вызывает чрезвычайно сильное термическое воздействие**
Arcs cause strong thermal stresses
 - **Вторичный взрыв (маслонаполненное оборудование)**
Secondary explosion (oil filled devices)

Последствия токов КЗ Consequences of short-circuit current

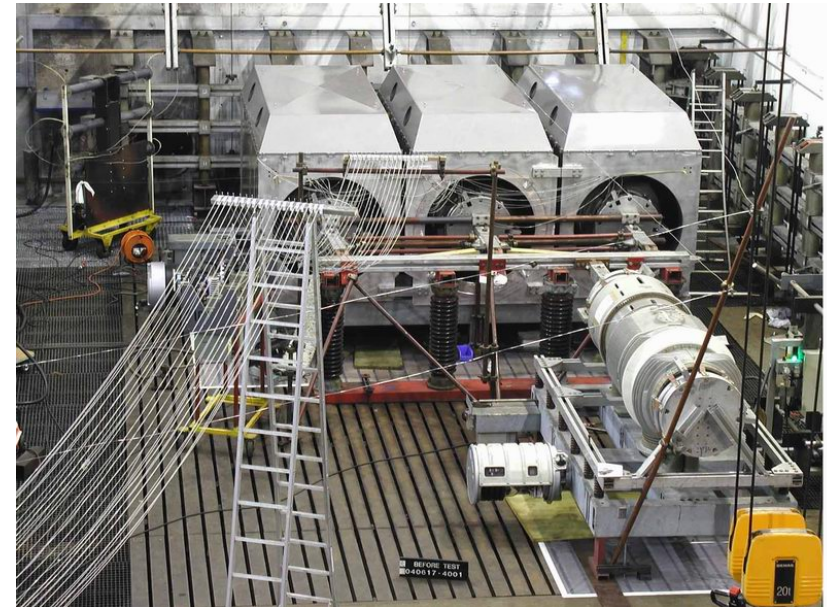
- **значительные механические усилия вследствие протекания токов КЗ стремятся оттолкнуть контакты друг от друга**
higher force during short-circuit current passage tending to repel contacts
- **разогрев “высокоомного контакта” приводит к привариванию контактов и выходу их из строя**
heating of 'high-ohmic'
contact bridges and contact damage
- **изменения времени горения дуги**
changes in arcing time
- **изменения энергии, диссипируемой при горения дуги в дуговой камере**
changes in energy to be dissipated by the arc in the arcing chamber



Воздействия на коммутационные устройства Impact on switching devices



выключатель нагрузки 12 кВ 700А
load break switch 12 kV 700 A



генераторный выключатель 210 кА
generator circuit breaker 210 kA

Высвобождение экстремальной тепловой энергии при дугообразовании в процессе коммутации

Release of extreme thermal energy by switching arc

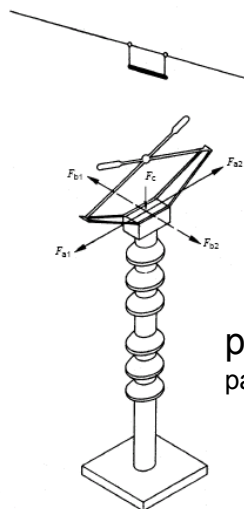
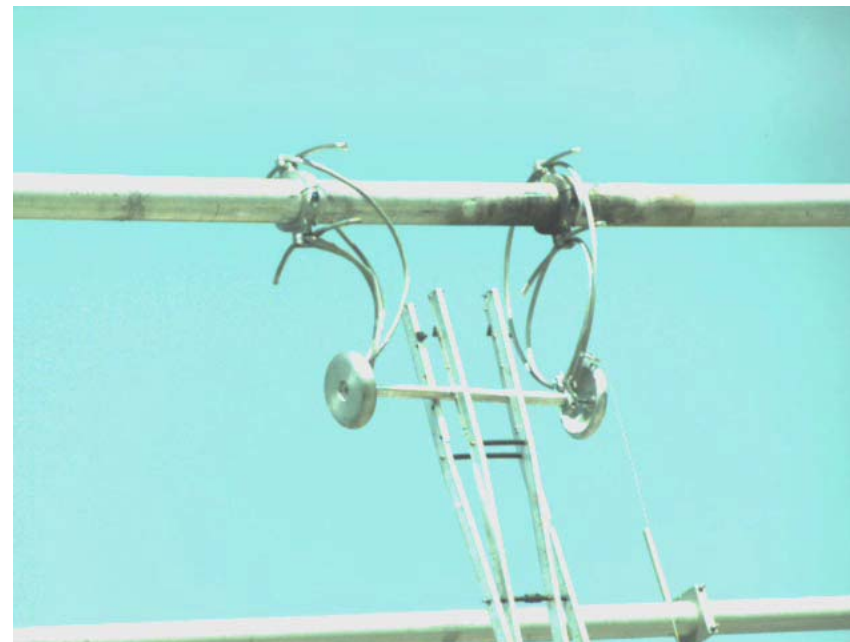
Современные выключатели имеют параметры до 90-100 кА (@ 245 кВ)

Circuit breakers now up to 90-100 kA (@ 245 kV)

Разрабатываются генераторные выключатели до 250 кА (30 кВ)

Generator circuit breakers going to 250 kA (@ 30 kV)

Воздействия на разъединители Impact on disconnectors



Силы, возникающие при прохождении больших токов, стремятся разъединить контакты, что приводит к дугообразованию и последующему повреждению
 High current passage forces contacts to open, followed by arcing and damage

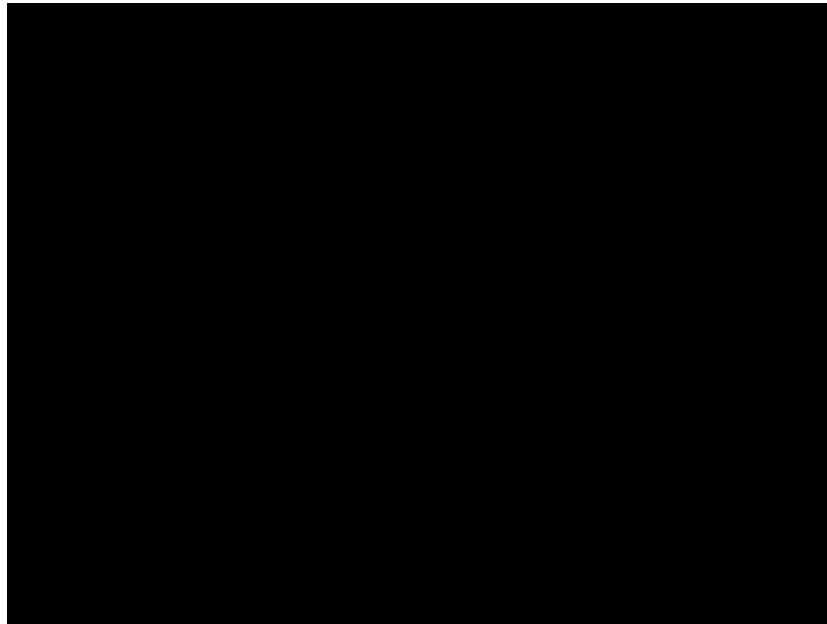
разъединитель пантографного типа
 pantograph disconnector

Первая часть видеозаписи: 130 кА пиковое значение при действующем значении 82 кА
 first section of video: 130 kA_{pk} - 82 kA RMS

Вторая часть: 155 кА пиковое значение при действующем значении 61 кА
 second section: 155 kA_{pk} - 61 kA RMS

Воздействия на воздушные линии электропередач

Impact on overhead lines



линии электропередач на 50 кА
overhead line 50 kA



воздействие на распорки
effect on spacer

Силы стремятся сблизить расщепленные фазы

Causes contraction of lines

Ударные воздействия большой величины

High impact forces

Дугообразование при соприкосновениях

Commutation arcing at moment of touch

Экстремальные воздействия на распорки

Extreme forces compressing line spacers

Воздействия на реакторы и трансформаторы

Impact on reactors and transformers



ВЧ-заградитель line trap

В обмотках возникают значительные механические силы

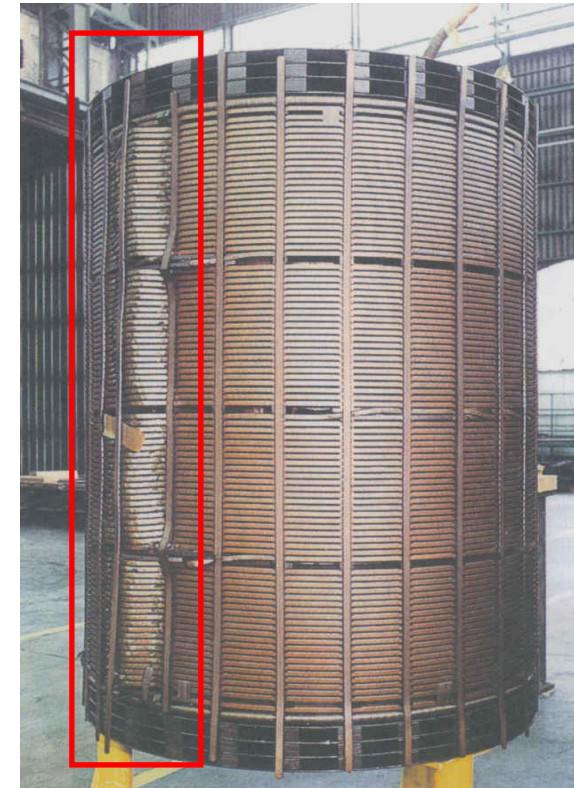
Causes forces in winding

Трансформатор должен быть очень крепким

Transformers must be very strong

Аксиальные и радиальные силы

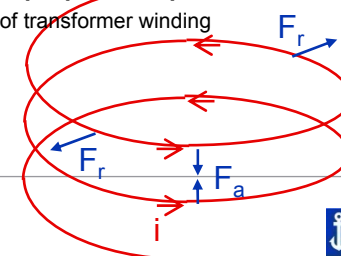
Axial and radial forces



Деформация

трансформаторной обмотки

buckling of transformer winding



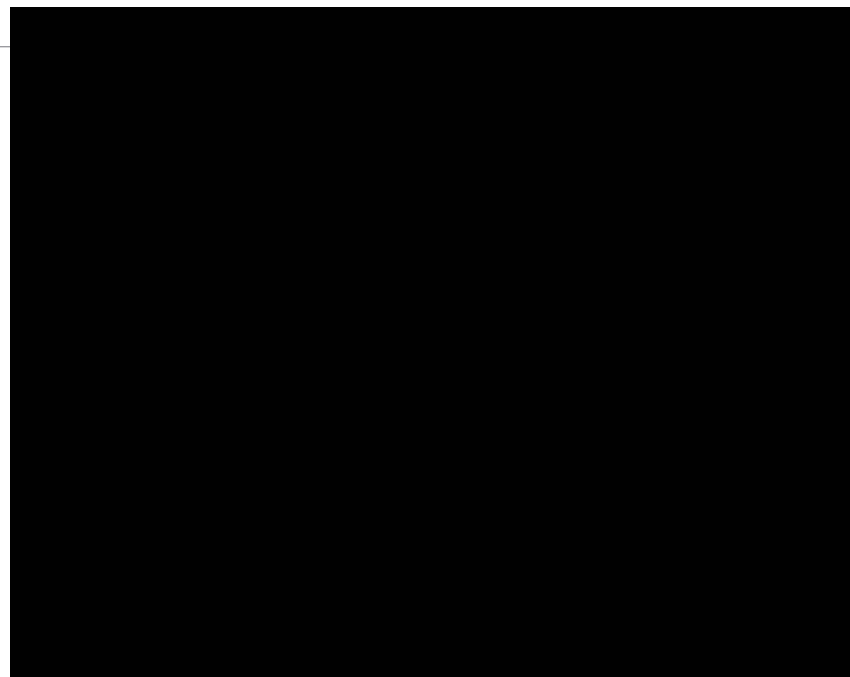
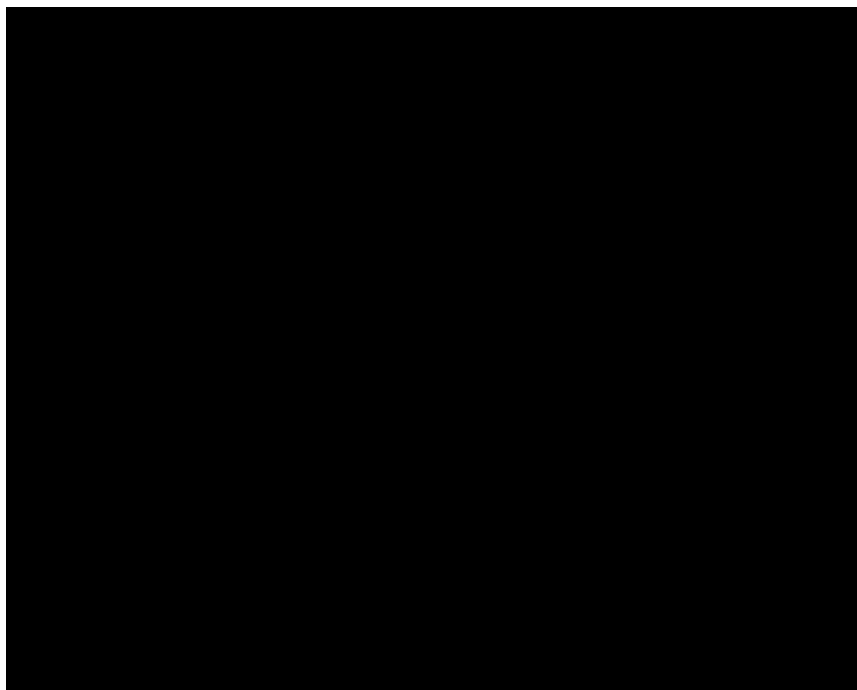
Воздействия на трансформаторы Impact on transformers



250 MVA – 230 kV

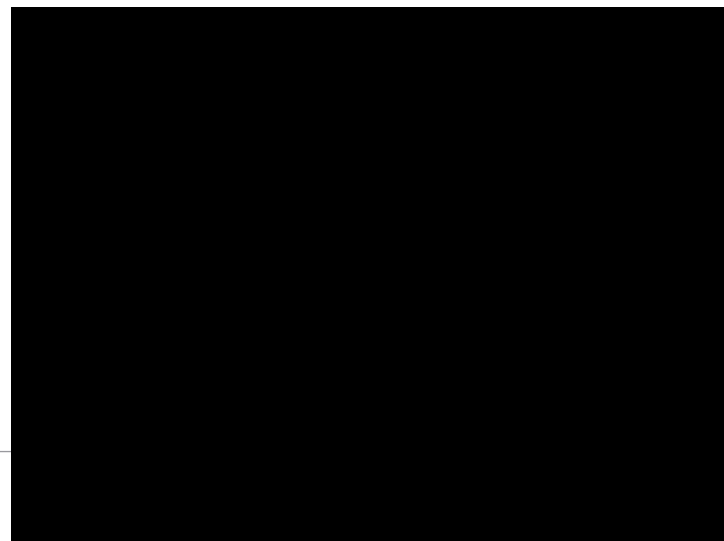
Жесткие механические воздействия при токах КЗ
severe mechanical shock at short circuit

Воздействия на трансформаторы Impact on transformers



Выброс масла при возникновении токов КЗ

Oil spraying at short-circuit application



Воздействия на трансформаторы Impact on transformers

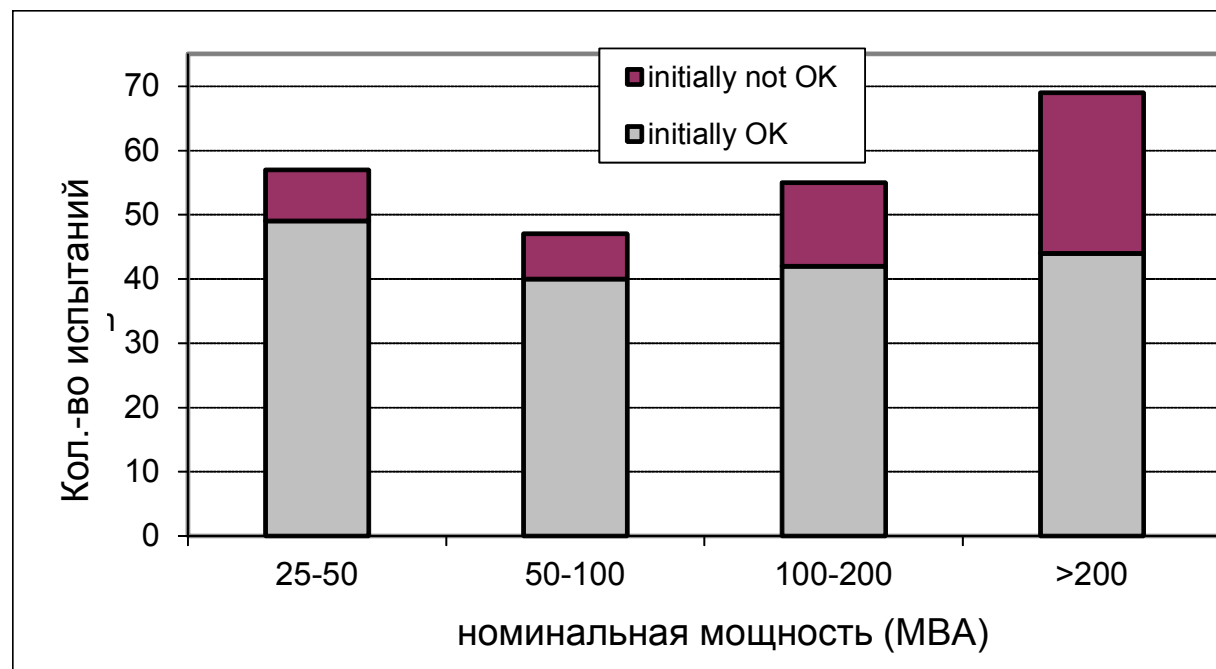
Виды аварий и повреждений Failure modes

- **Внутренние** Internal
- **Деформации обмоток (вспучивание)** Buckling of winding
- **Деформация опор и систем крепления** Support deformation
- **Скручивание** Spiralling
- **Сжатие** Compression
- **Повреждение регуляторов напряжений** Damage to tap
- **Внутренняя дуга** Internal arc
- **Внешние** External
- **Выброс масла** Oil spraying
- **Срабатывание реле Бухгольца** Buchholz relay operating
- **Разрушение вводов** Broken bushings



Статистика отказов трансформаторов при проведении испытаний на токи КЗ

Failure rate of transformers in short-circuit test



Испытательная статистика с 1996 – 2012

Test statistics from 1996 – 2012

было испытано 228 трансформаторов ≥ 25 МВА

228 transformer tests ≥ 25 MVA

23% не смогли пройти испытания

23% did not pass short-circuit test

Воздействие дуги Impact of fault arc



КЗ в кабельной муфте 15 кА fault in cable joint 15 kA
Жесткое термическое воздействие от дуги

Severe thermal effect of fault arcs

Возрастание давления приводящее к разрыву оболочки

Pressure rise, bursting of enclosure

Тепловое излучение направленное к изоляторам

Thermal radiation to insulators

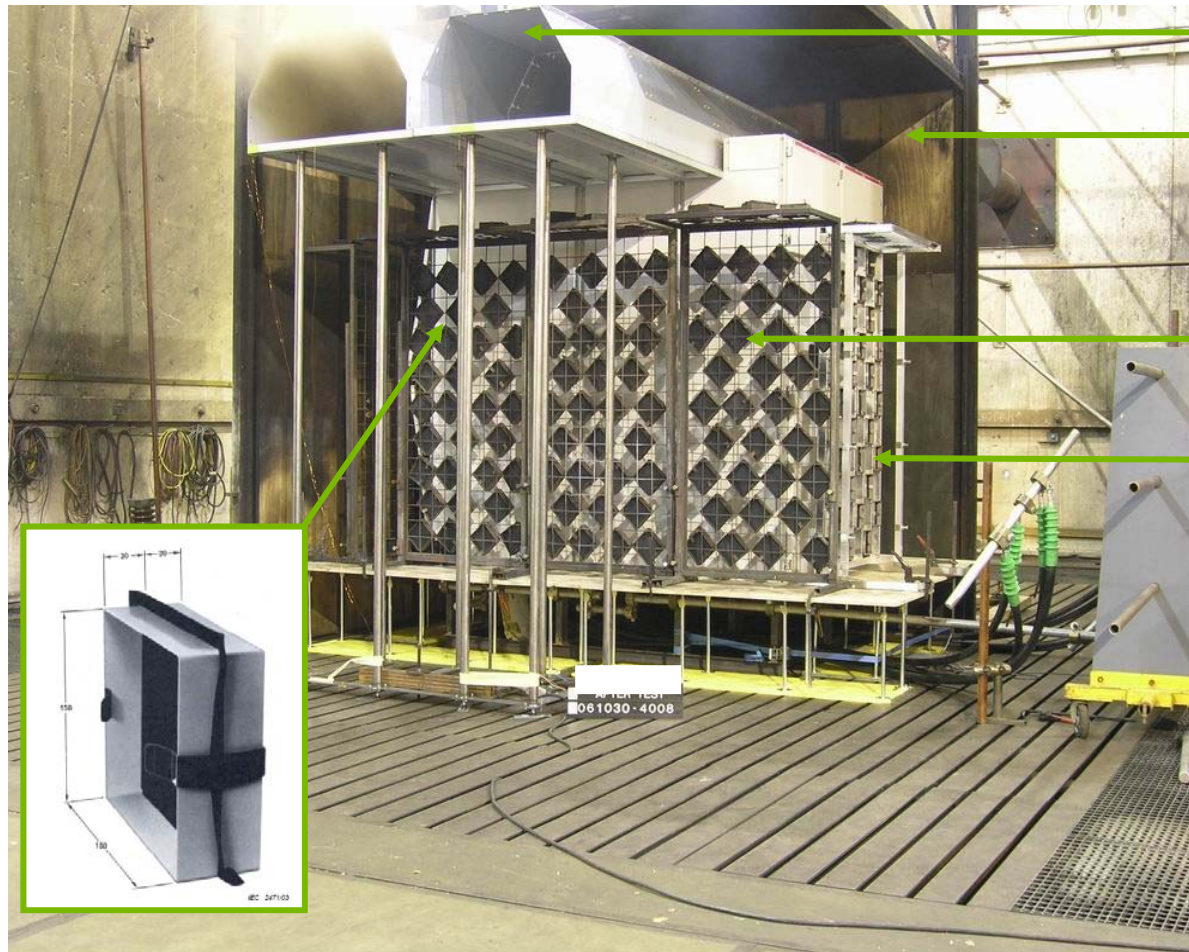
Движение открытой дуги по направлению от её источника

Arcs tends to wander away from its origin

гирлянда изоляторов, дуга 50 кА
insulator string 50 kA power arc

Испытания на внутреннюю дугу (локализационные испытания) Internal arc test

Хлопчатобумажные индикаторы имитирующие рабочую одежду Cotton indicators mimic worker's clothing



Система отвода газов
exhaust

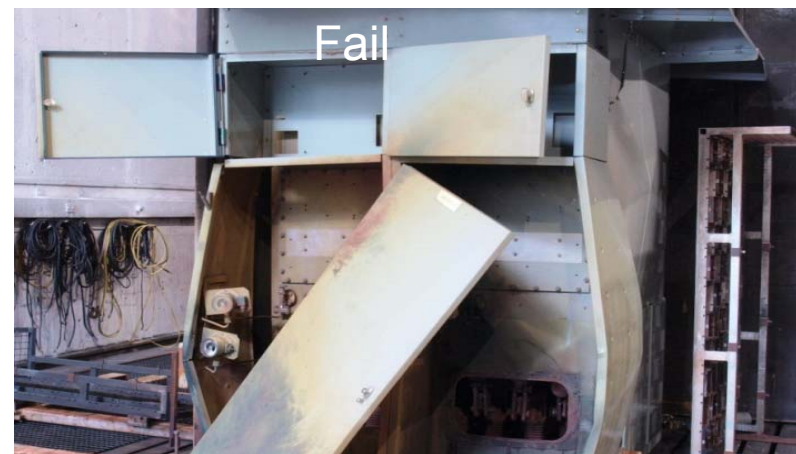
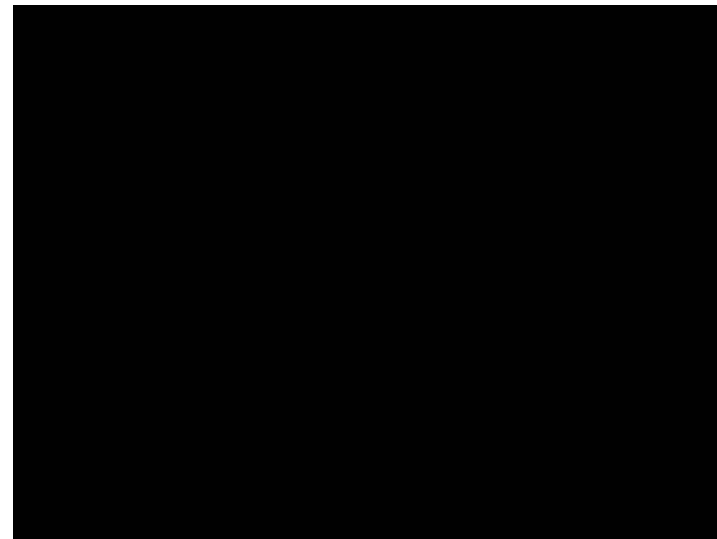
Моделирование
помещения
room simulation

Фронтальные
индикаторы
front indicators

Боковые
индикаторы
lateral indicators

Примеры локализационных испытаний (на внутреннюю дугу)

Examples of internal arc tests



Воздействие внутренней дуги Impact of internal arcs



дуговые локализационные испытания
на 63 кА internal arc test 63 kA



внутренняя дуга в ТТ на 50 кА
current transformer internal fault 50 kA

Локализационные испытания на внутреннюю дугу в панелях распределительных устройств

Internal arc tests in switchgear panels

Должен быть обеспечен безопасный отвод отходящих газов

Exhaust gases must be released in a safe way

Риск возникновения вторичного взрыва маслонаполненного оборудования

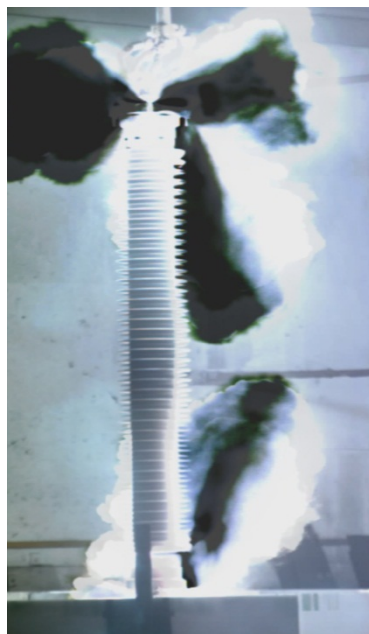
Risk of secondary explosion of oil-filled devices

Риск выхода загрязненного элегаза наружу через разрушенную оболочку

Risk of release of contaminated SF6 (burnthrough)



Воздействия на ОПН Impact on surge arresters



447 кА при 3 кГц + 31.5 кА при 60 Гц
447 kA @ 3 kHz + 31.5 kA @ 60 Hz

Дугообразование при 80 кА 80 kA initial fault arc

Образовавшаяся дуга не должна приводить к взрыву оболочки или корпуса

Fault arc inside arrester block column

Дуга должна переместиться наружу оболочки

Arc must be expelled expelled to outside

Не допускается широкий разлет осколков

No wide-spread fragmentation allowed

Возможны экстремальные токи в последовательно соединенных компенсаторных конденсаторных батареях

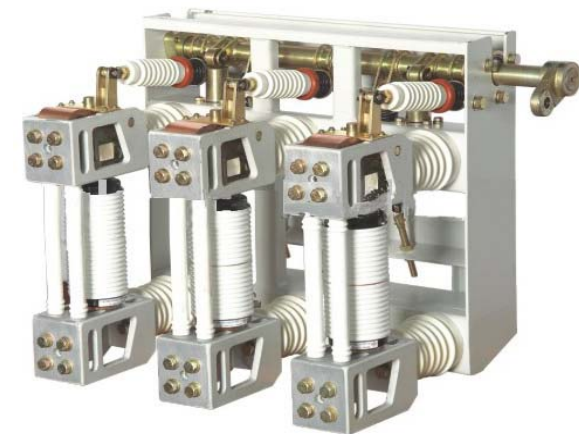
Extreme currents in series compensation cap banks

Выключатели Circuit breakers

Выключатели должны прерывать токи КЗ Circuit breakers must interrupt the current during a short circuit



Shin-Haruna S/S, TEPCO, Japan

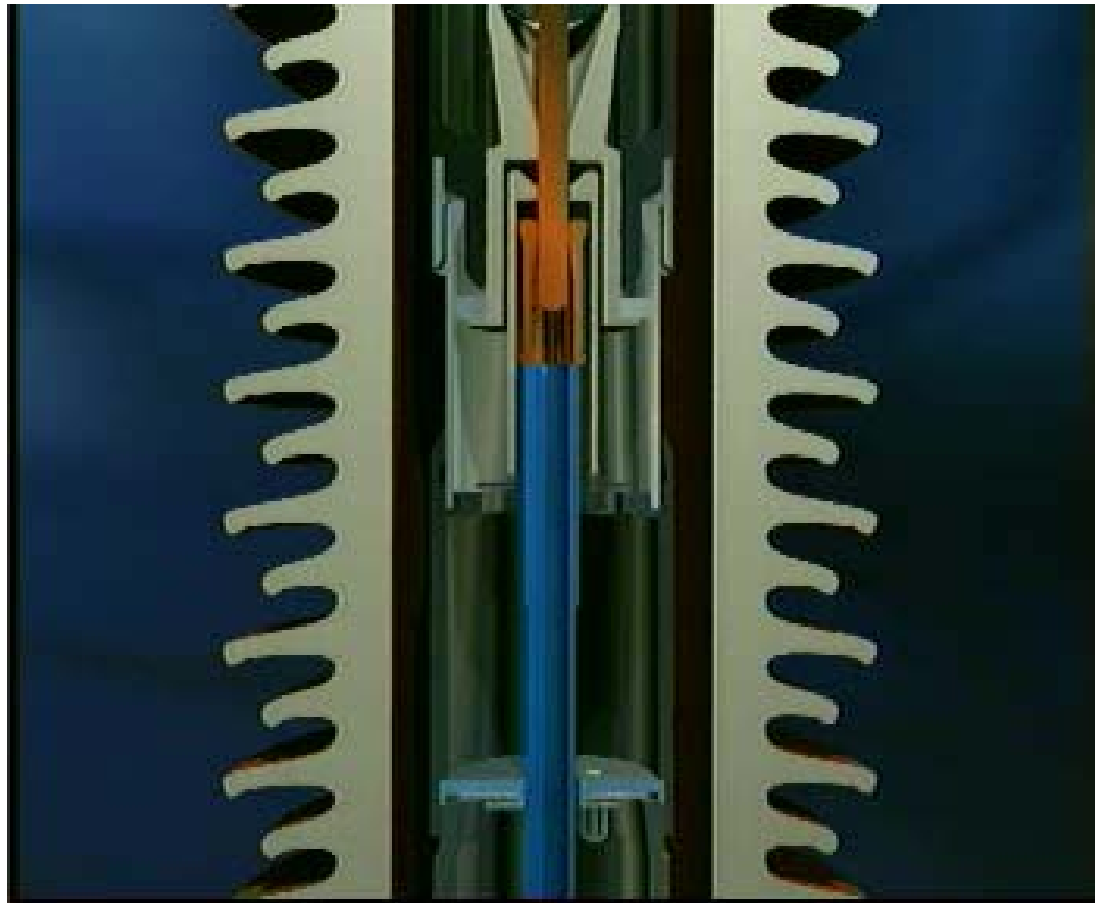


Процесс прерывания тока Current interruption process



Процесс прерывания в элегазовом выключателе

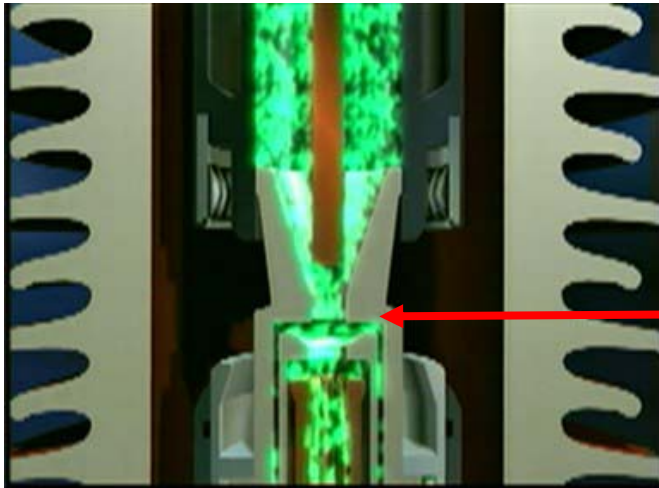
Interruption process in an SF6 circuit breaker



Любезно предоставлено компанией SIEMENS
Courtesy of Siemens

Воздействие возникающих напряжений в выключателе

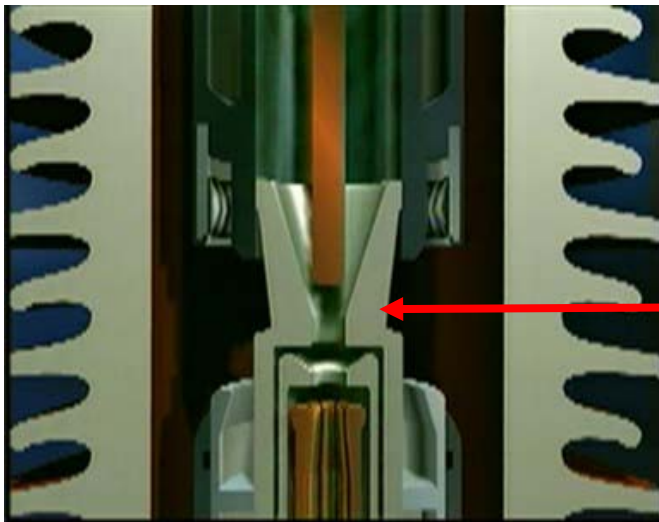
Voltages stresses in the breaker



Непосредственно после прерывания, между контактами выключателя, в которых находятся горячие газы, стремительно возрастает напряжение:

термическое воздействие

Immediately after interruption, hot gases remain in the gap and feel fast rising voltage: **thermal stresses**



В последующий период времени между контактами напряжение достигает очень больших величин: **воздействие на диэлектрик**

A little later, a very high voltage is reached across the open gap: **dielectric stresses**

Прямые испытания Direct testing

Ток и напряжение подаются от одного источника

Current and voltage from single source

■ Непосредственно от силовой сети

Directly on the power grid

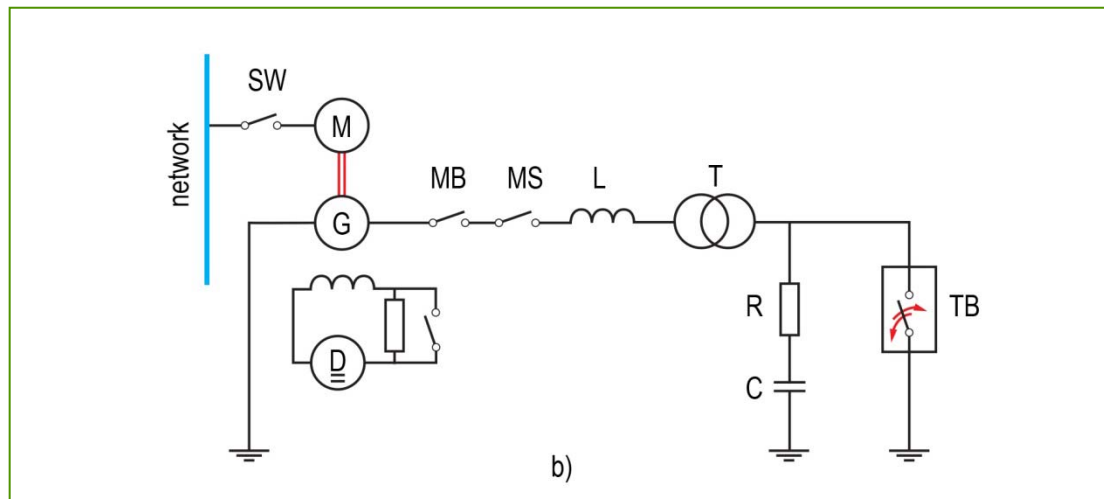
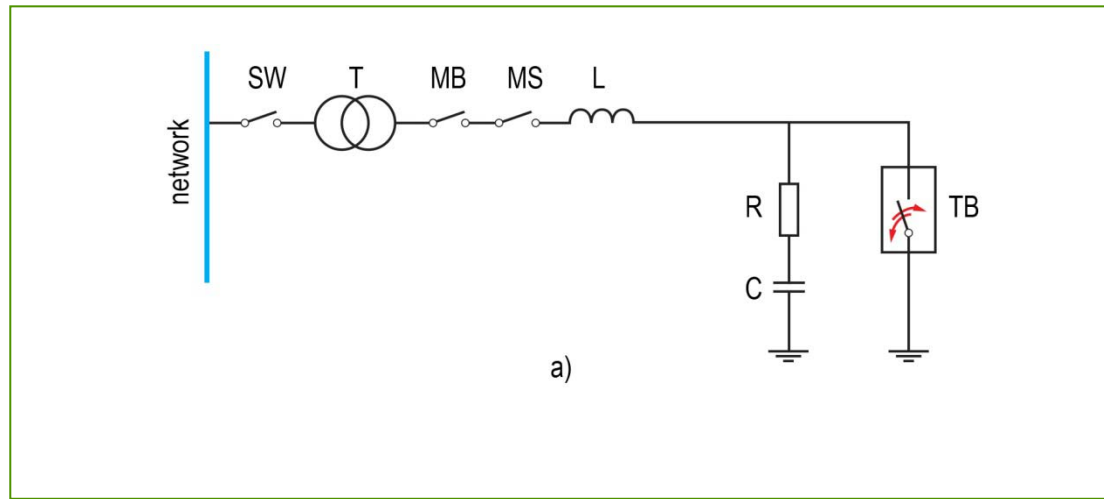
- **преимущества: возможность использования больших мощностей**
pro: high power available
- **недостатки: сложность подбора режимов испытаний тестируемого объекта, сложности с согласованием графика испытаний, риск повреждений**
con: difficult to match with test object, poor availability, risk of damage

■ Посредством использования ударного генератора

With generator-fed power supply

- **преимущества: высокая гибкость, простота настройки на режимы испытаний, большая безопасность для тестируемого объекта, отсутствие негативных воздействий на силовую сеть**
pro: high flexibility, easy to adjust, safe for test object, no grid interaction
- **недостатки: необходимость больших инвестиций**
con: high investment

Схемы прямых испытаний Direct testing set-ups

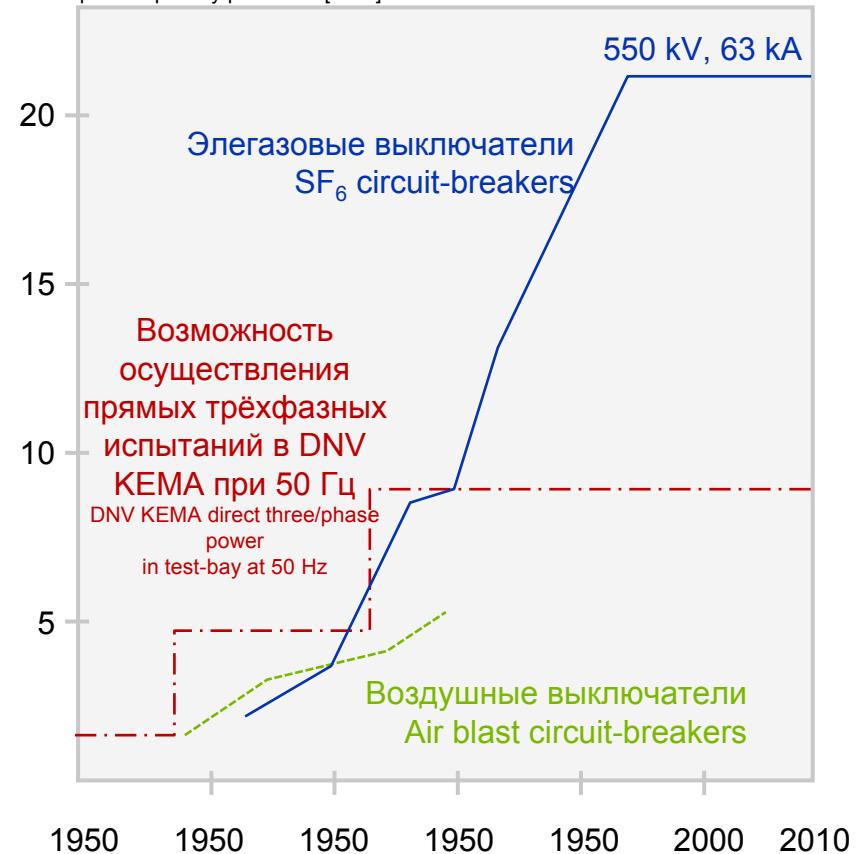


Тем не менее... However...



Техническая возможность коммутационных испытаний различных типов выключателей в ГВА

Interruption capability per break [GVA]



Пример: 3-х фазные испытания выключателя на токи КЗ

Example: short-circuit testing a circuit breaker (three phase)

- **Напряжение: 420 кВ**

Voltage: 420 kV

- **Токи КЗ: 63 кА**

Fault current: 63 kA

- **Частота: 50 Гц**

Frequency: 50 Hz

- **Необходимая мощность = $420 \text{ кВ} \times 63 \text{ кА} \times \sqrt{3} = 45830 \text{ МВА}$**

Power required = $420 \text{ kV} \times 63 \text{ kA} \times \sqrt{3} = 45830 \text{ MVA}$

- Т.о., мощность, которую необходимо обеспечить для проведения прямых испытаний в данном случае, превышает возможности какой-либо лаборатории в мире (например, в DNV KEMA: 8400 MVA)

Exceeds direct power available at any test lab (e.g. DNV KEMA: 8400 MVA)

- **Возможные решения**

Possible solutions

- **Однофазные испытания: необходимая мощность = $45830 \text{ МВА} / 3 = 15277 \text{ МВА}$**

Single phase testing: power required = $45830 \text{ MVA} / 3 = 15277 \text{ MVA}$

- **Испытание по 1/2 полюса = $15277 \text{ МВА} / 2 = 7638 \text{ МВА}$**

Half-pole testing: power required = $15277 \text{ MVA} / 2 = 7638 \text{ MVA}$

- **Все еще превышает силовые характеристики большинства наиболее мощных лабораторий**

Still exceeds power-voltage characteristics of the most powerful labs

Нужны различные методы испытаний A different method is required

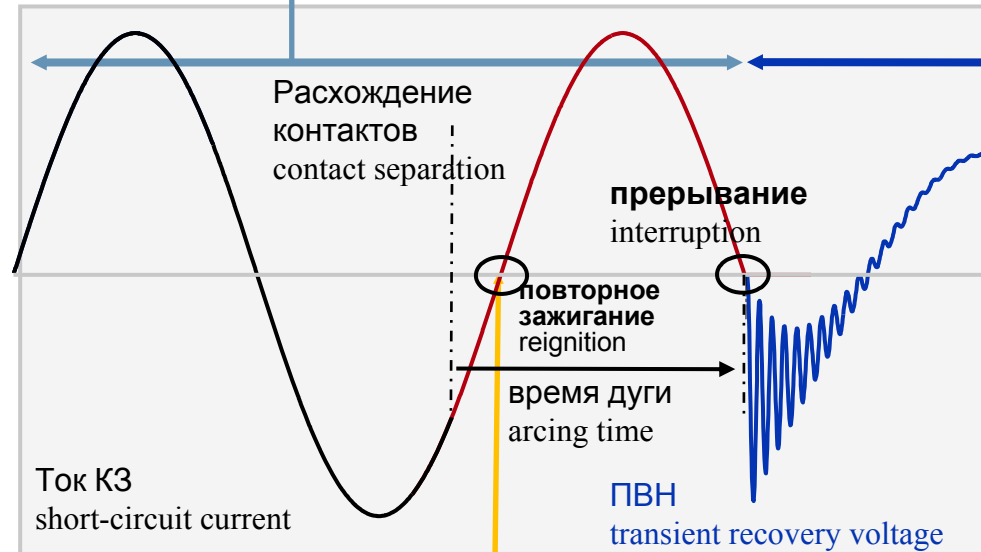
Требования к испытаниям выключателей

Requirements for testing a circuit breaker

перед прерыванием: необходима достаточная мощность для поддержания полного (дугового) тока при умеренных напряжениях (< 60 kV)

before interruption: need enough power to maintain the full (arc) current at moderate voltage (< 60 kV)

- от генератора
from generators



после прерывания: необходимо иметь только источник достаточно высокого напряжения

after interruption: only need a sufficiently high voltage

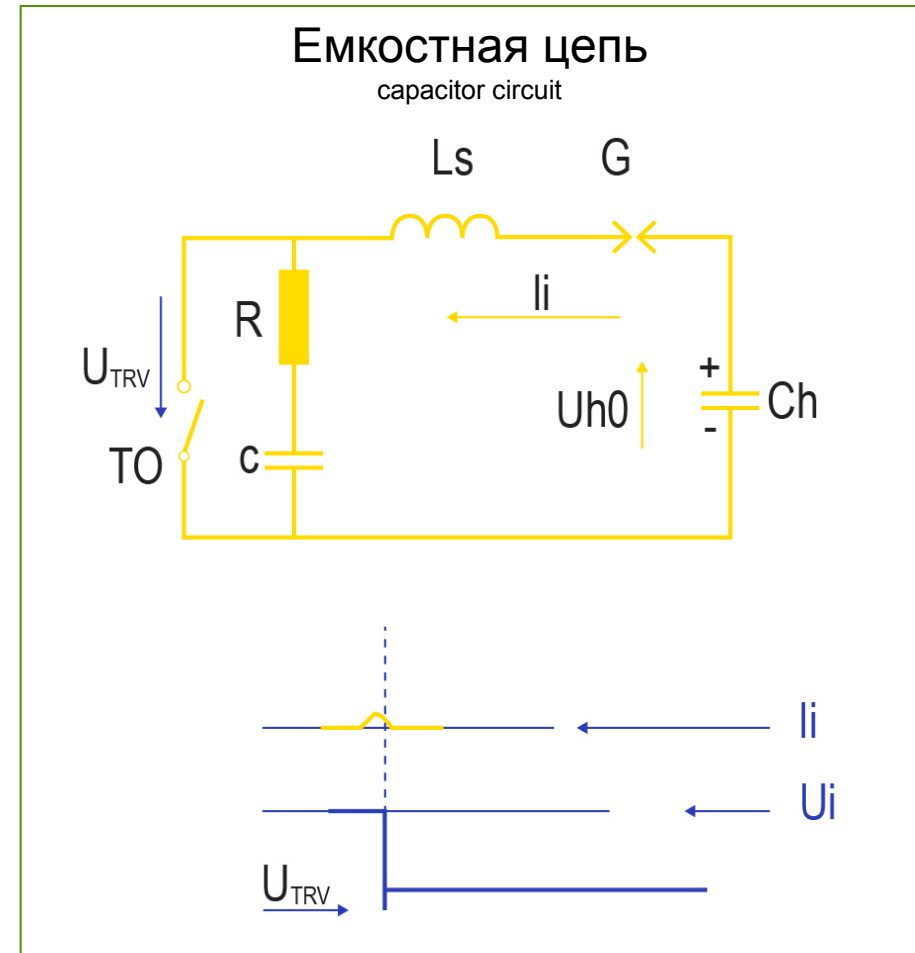
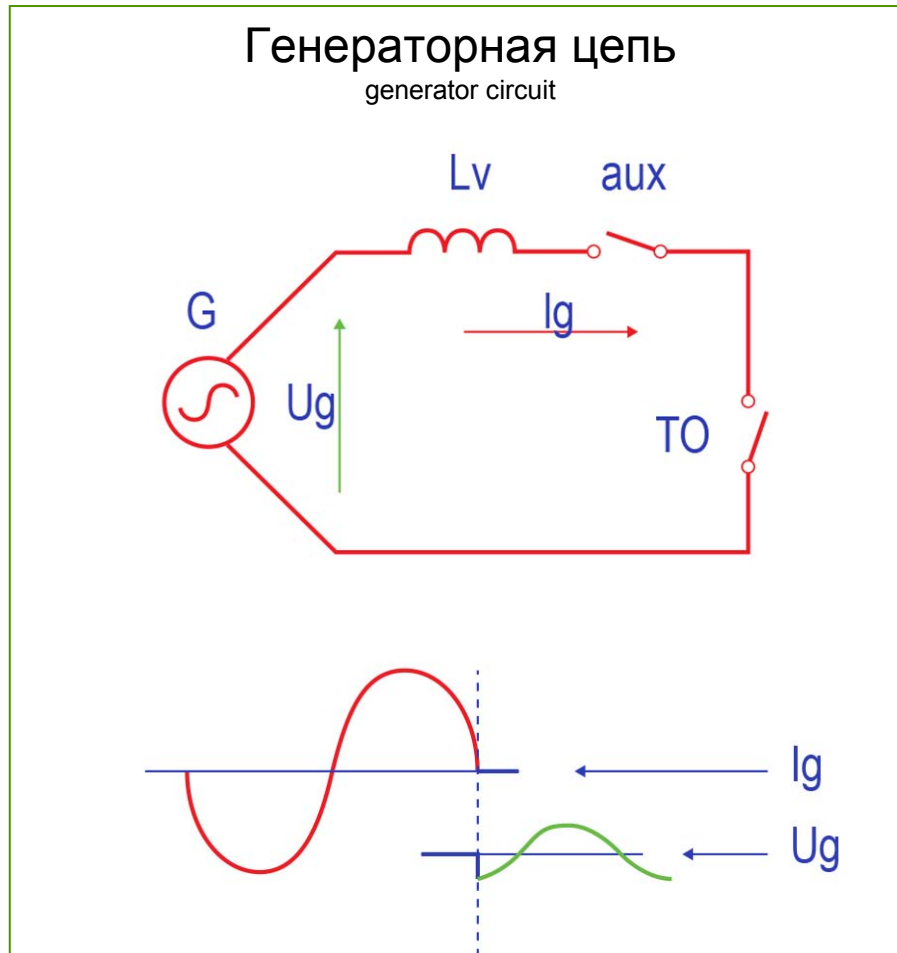
- от предварительно заряженного конденсатора
from pre-charged capacitor

Необходима специальная цепь для повторного поджига дуги

special circuit needed to reignite the arc

Синтетические испытания Synthetic testing

Ток и напряжение подводятся от разных источников Current and voltage from multiple sources



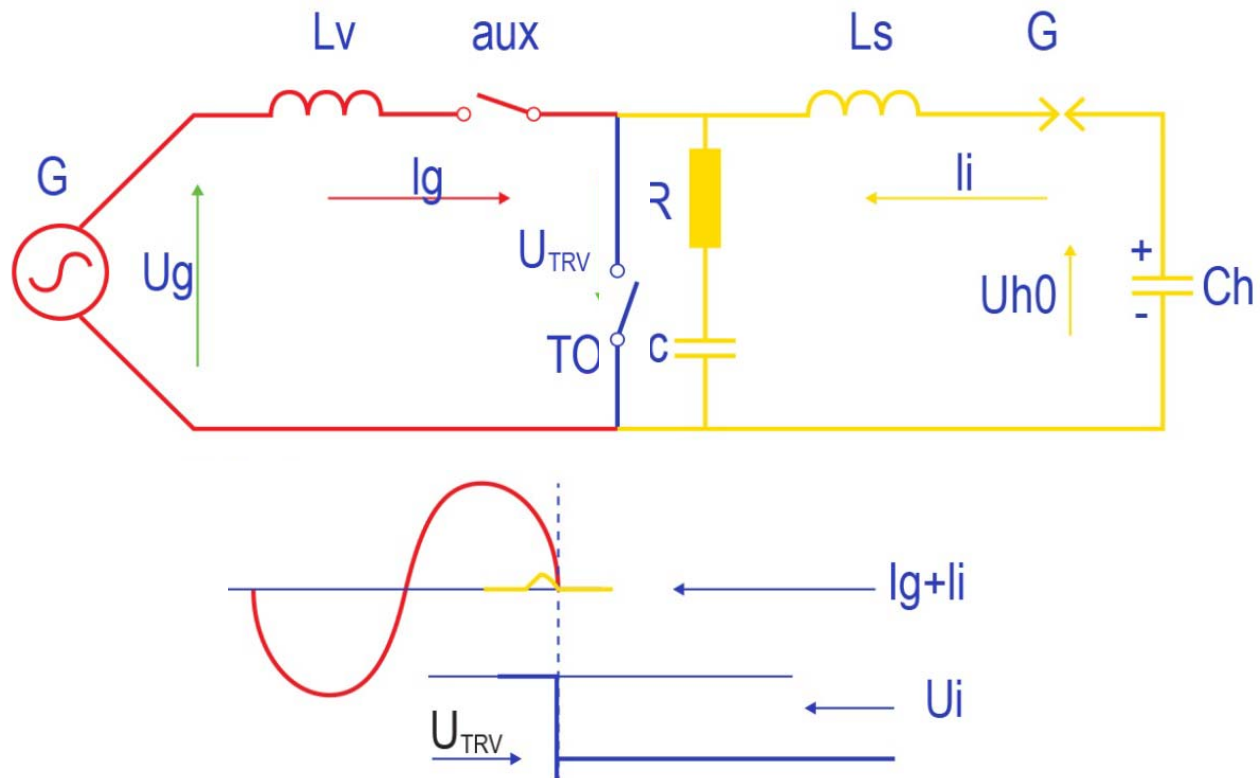
Синтетические испытания Synthetic testing

Ток и напряжение подводятся от разных источников

Current and voltage from multiple sources

Синтетическая цепь (с параллельной инъекцией тока)

Synthetic circuit (with parallel current injection)



Инновации в лабораториях DNV KEMA в 2008 - 2015

Innovations at DNV KEMA laboratories 2008 - 2015

- **Подготовка к ВВ испытаниям аппаратов на 1200 кВ**
Prepared for UHV up to 1200 kV
- **Полные 3-х фазные синтетические испытания**
Full three-phase synthetic testing
- **Программа по увеличению мощности токов КЗ на 50%**
Program for increased short-circuit power by 50%
- **Испытания генераторных выключателей до 300 кА**
Generator circuit breaker testing up to 300 kA
- **Испытания трансформаторов на напряжения до 800 кВ**
Transformer short-circuit testing going up to 800 kV
- **Переход на цифровое получение и обработку сигналов**
Цифровые Digital signal acquisition and processing
- **Развитие испытательной базы для испытаний высоковольтных вакуумных выключателей**
Development for high-voltage vacuum circuit-breaker testing
- **Лаборатория для испытаний кабелей постоянного тока**
DC test lab for DC cable testing
- **Проведение НИР с производителями и университетами**
R&D work with manufacturers and universities
- **Новая ВВ лаборатория**
New high-voltage laboratory
- **Приобретение новых лабораторий**
Acquisitions of new laboratories

Инновация 1: Подготовка к ВВ испытаниям аппаратов на 1200 кВ

Innovation 1: Prepared for UHV up to 1200 kV

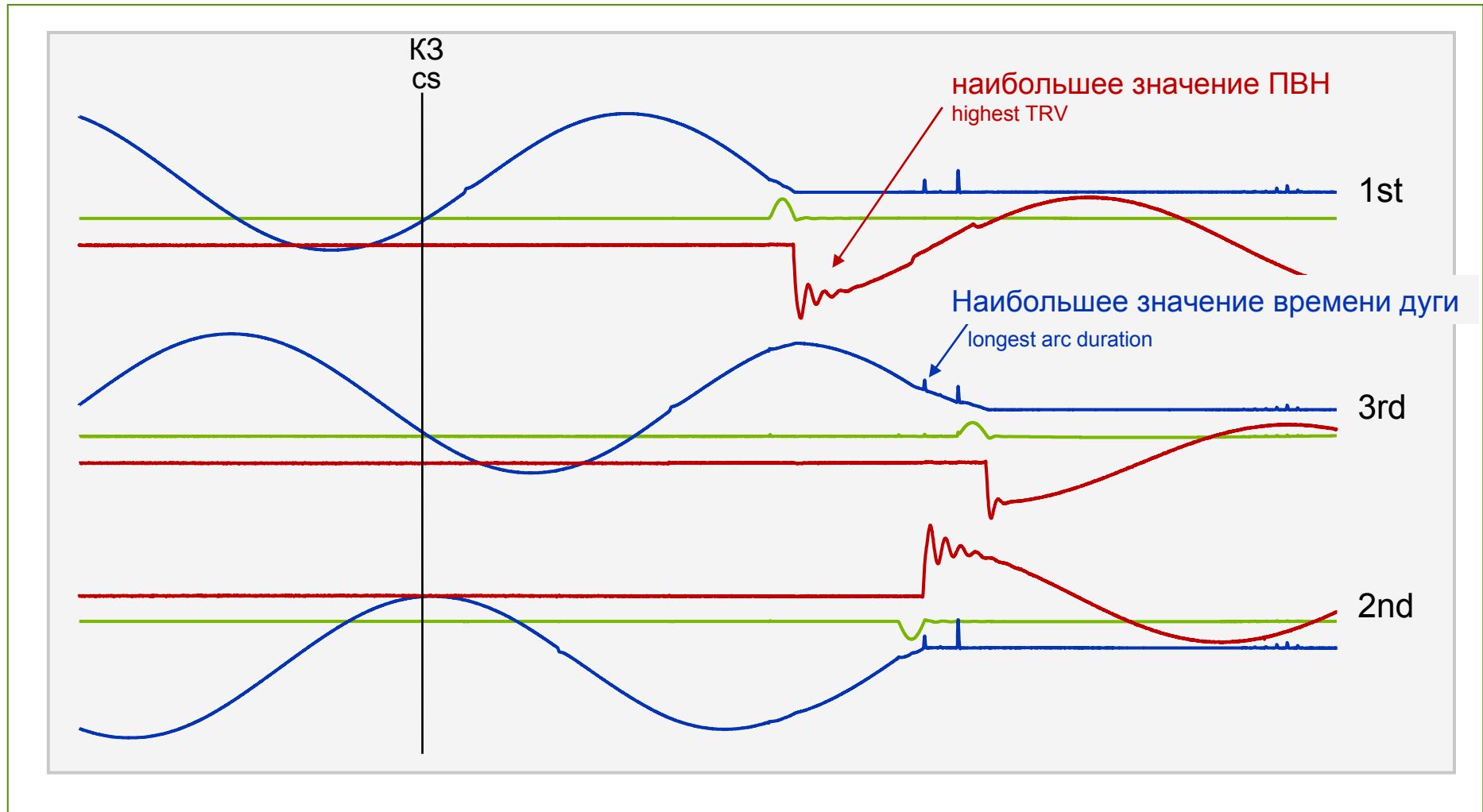


- Испытания выключателя 1150 кВ для УВН сетей Китая и Индии
Test of 1100 kV circuit-breaker for the Chinese/Indian UHV grid
- ПВН до 2000 кВ и токов КЗ до 63 кА
Transient recovery voltages up to 2000 kV at 63 kA short-circuit current
- Открытие новой испытательной установки в января 2013
New test installation opened January 2013
- СССР был первой страной мире, разработавшей УВН сети в 1980-х
USSR first in the world to develop UHV grids in 1980s



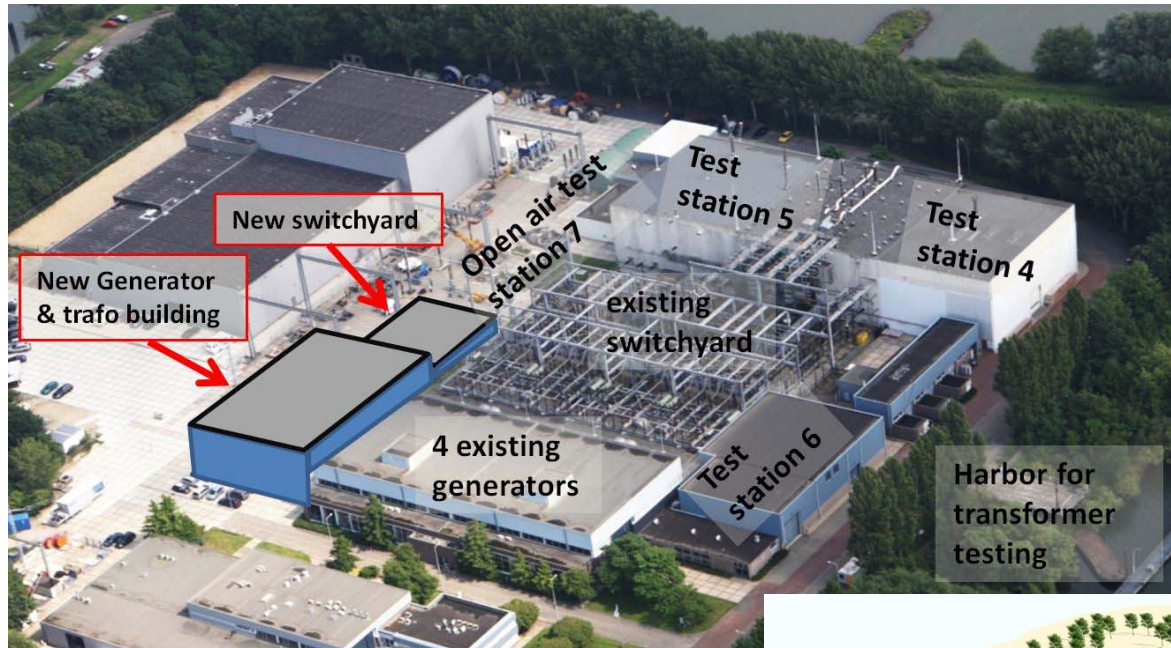
Инновация 2: Полные 3-х фазные синтетические испытания

Innovation 2: Full three-phase synthetic testing



Иновация 3: Программа по увеличению мощности токов КЗ на 50%

Innovation 3: Increase short-circuit power by 50%



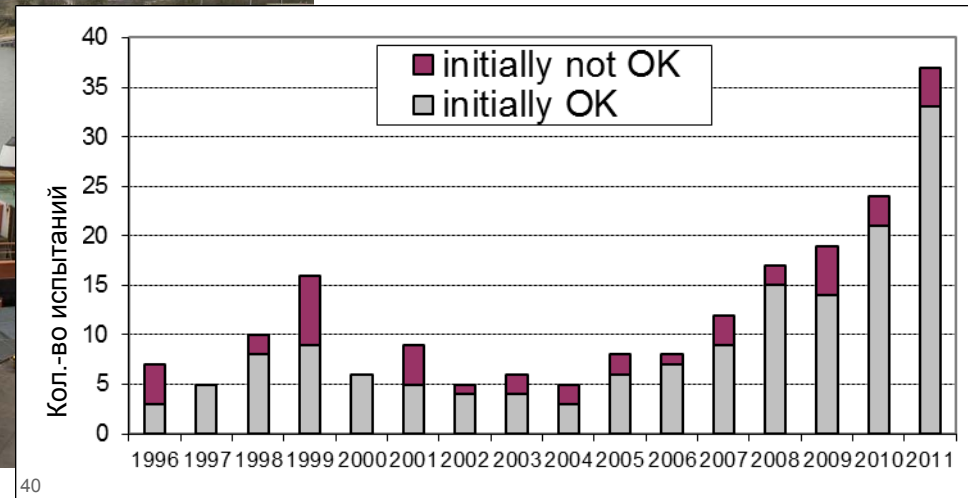
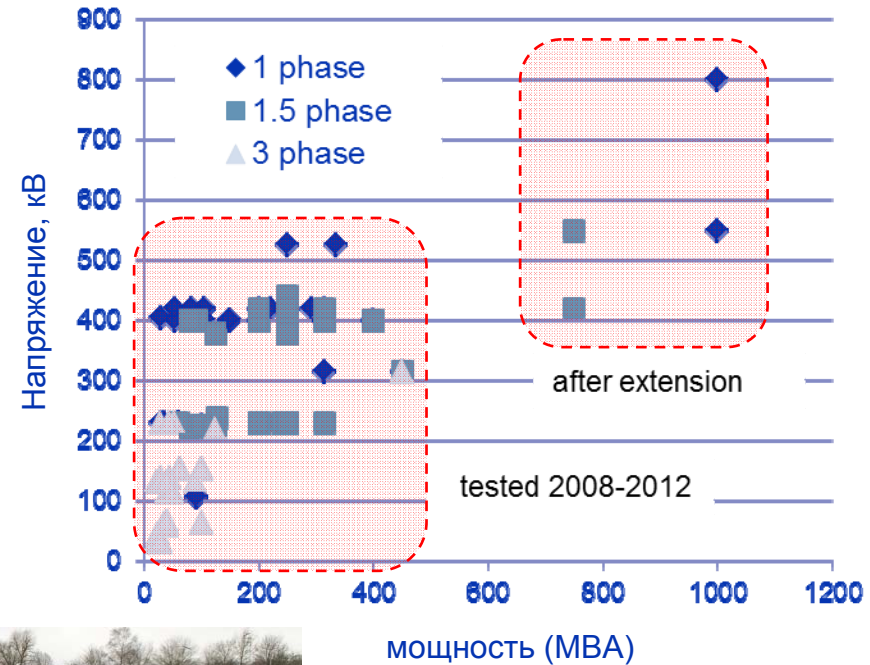
- 70 миллионов EURO
ИНВЕСТИЦИИ,
ГОТОВНОСТЬ К КОНЦУ
2015
70 Million EURO investment, ready for
end 2015



Иновация 3: Испытания силовых трансформаторов большей мощности на стойкость к КЗ

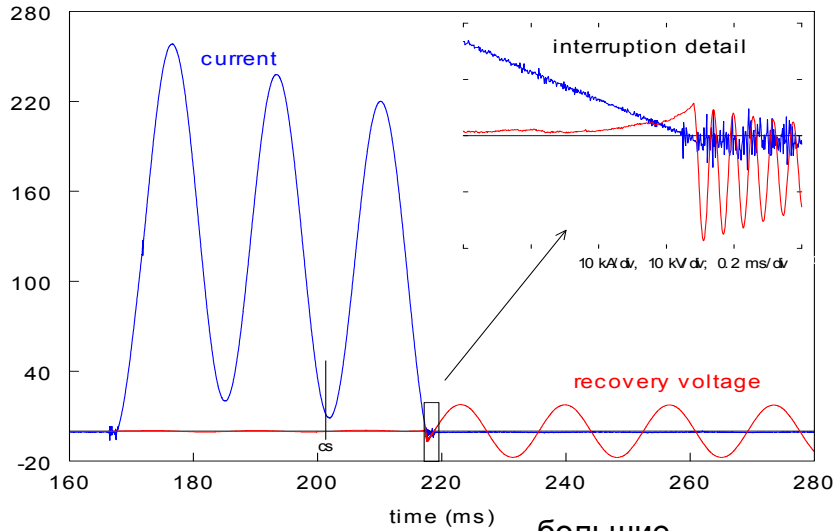
Innovation 3: Larger power transformer short-circuit testing

- стремительное возрастание запросов на проведение испытаний на стойкость к КЗ
rapid rise in demand for short-circuit testing
- новая испытательная инфраструктура для очень больших трансформаторов
new test-infra-structure for very large power transformers
- Расширение возможности лаборатории по проведению испытаний трансформаторов классов 800 кВ и 1000 МВА
Lab extension for 800 kV 1000 MVA class transformers

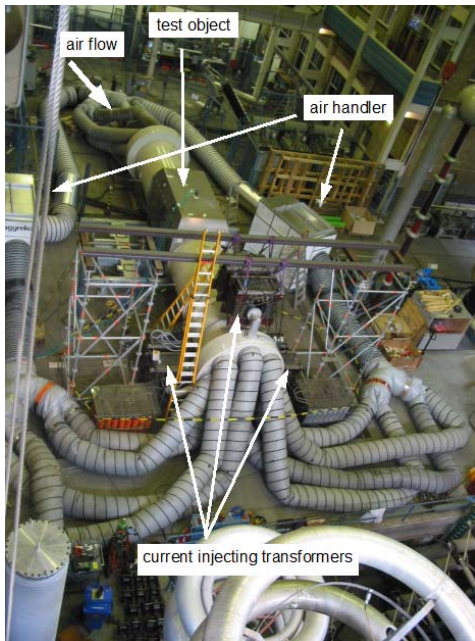


Иновация 4: Испытания генераторных выключателей на очень большие токи

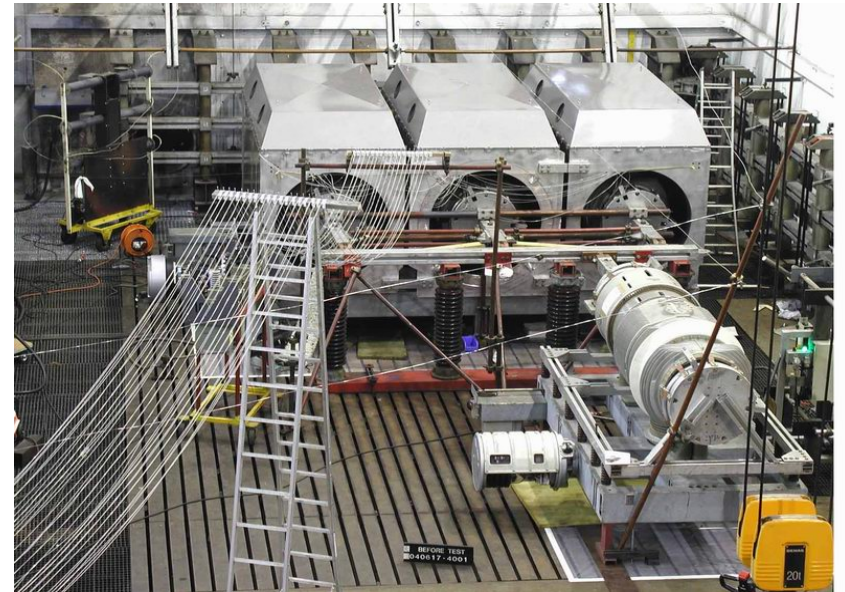
Innovation 4: Generator circuit breakers at very large current



большие значения постоянной времени затухания аperiodической составляющей delayed current zero



рабочие токи 25kA
25.000 A continuous current



Генераторный выключатель на 210 кА
generator circuit breaker 210 kA

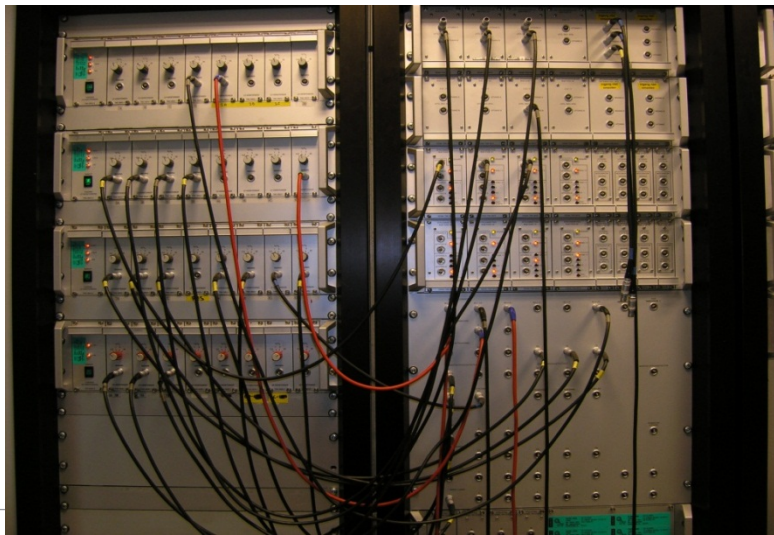


Токопровод на 400 кА
400 kArms busbar system

Инновация 5: Переход на цифровое получение и обработку сигналов

Innovation 5: Digital signal acquisition and processing

- пропускная способность передачи данных 120 Мб/с
120 MB/s data through-put
- частота дискретизации до 100 МГц
sampling frequencies up to 100 MHz
- разрешение до 14 бит
resolution up to 14 bit
- изготовленные на заказ цифровые инструменты позволяют оперативно разрабатывать испытательные цепи и проводить анализ данных
custom-made digital tools for test-circuit design and analysis



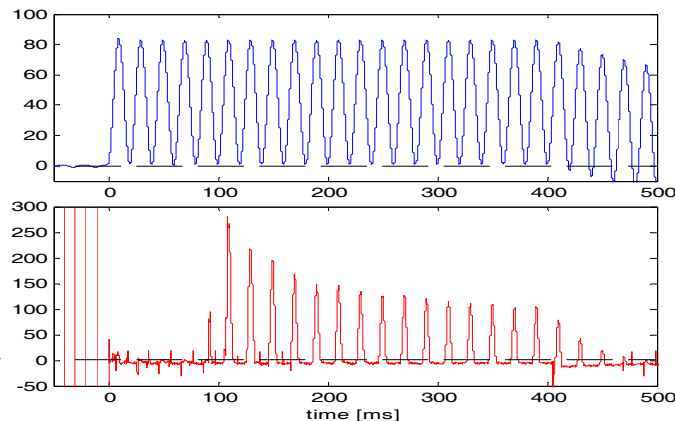
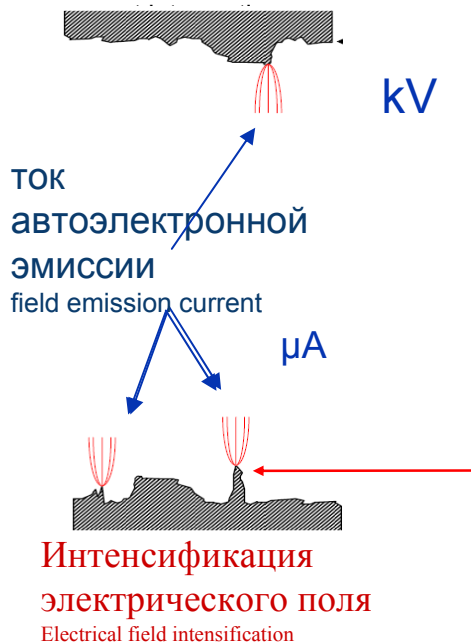
UpGrid Moscow
Oct. 30, 2013



Иновация 6: Проведение НИР с производителями и университетами

Innovation 6: R&D work with manufacturers, universities

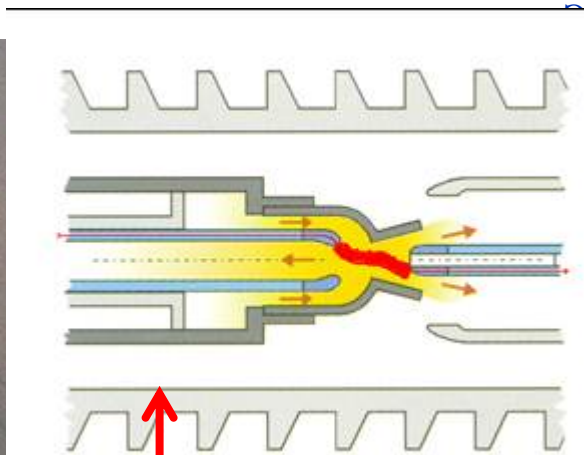
- Измерительные системы для очень малых токов
Measurement systems for very small currents
- Измерения с высокой разрешающей способностью в критической области прерывания тока
High-resolution measurements in critical region of



катушка Роговского на 500 кА – 100 мА
Rogowski coil for 500 кА – 100 мА



КЗ на ВВ ЛЭП
short-circuit in HV power line



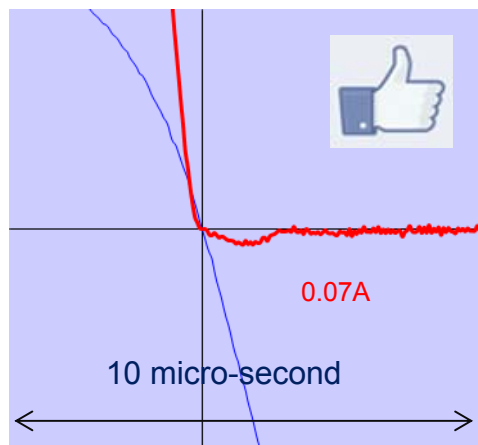
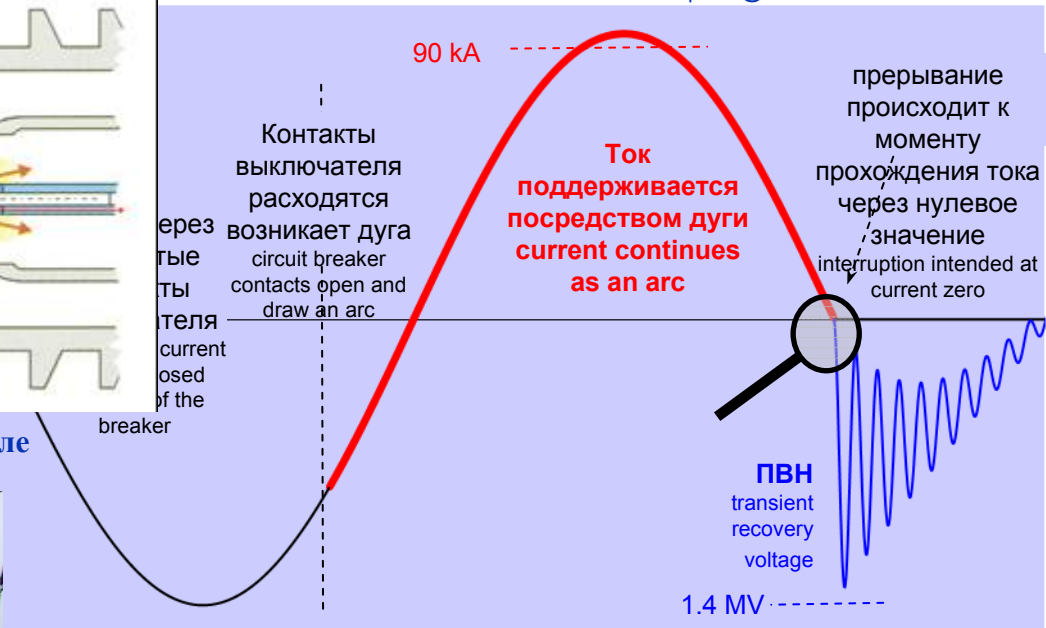
Дуга в выключателе
arc in circuit breaker



ВВ выключатель на подстанции
HV circuit breaker in an electrical substation

Электрическая визуализация прерывания тока КЗ

Electrical visualisation of short-circuit current interruption @ 800 kV



Если ток после прекращения дуги < 70 мА, прерывание ОК!
If post-arc current < 70 mA interruption OK



Если ток после прекращения дуги > 70 м, прерывание не состоялось
post-arc current > threshold interruption fails



Инновации 7: Новые лаборатории

Innovation 7: New laboratories

Наша новая ВВ лаборатория в г. Арнем (Нидерланды)

Our NEW high voltage laboratory at Arnhem

- Испытания объектов до 525 кВ
Test objects up to 525 kV
- Коммерческая работа с клиентами по всему миру
Commercially operating with clients worldwide
- Типовые испытания и испытания по НИР
Type testing and R&D testing
- Год основания ВВ лаборатории – 1937
The original HVL was founded in 1937



Пример испытаний в соответствии с требованиями ГОСТ

Test example with GOST standard



- Требования МЭК 62271-100

IEC 62271-100 standard:

O - 0.3 s – CO - 180 s – CO

- Требования ГОСТ 52565-2006

GOST 52565-2006 standard:

O - 0.3 s – CO - **20 s** – CO

- Необходима специальная испытательная стратегия

- очень большая мощность

- короткий интервал между операциями в цикле

needs special test strategy

- very large power

- short interval between voltage application

- Выключатель 110 кВ 40 кА, произведен в России

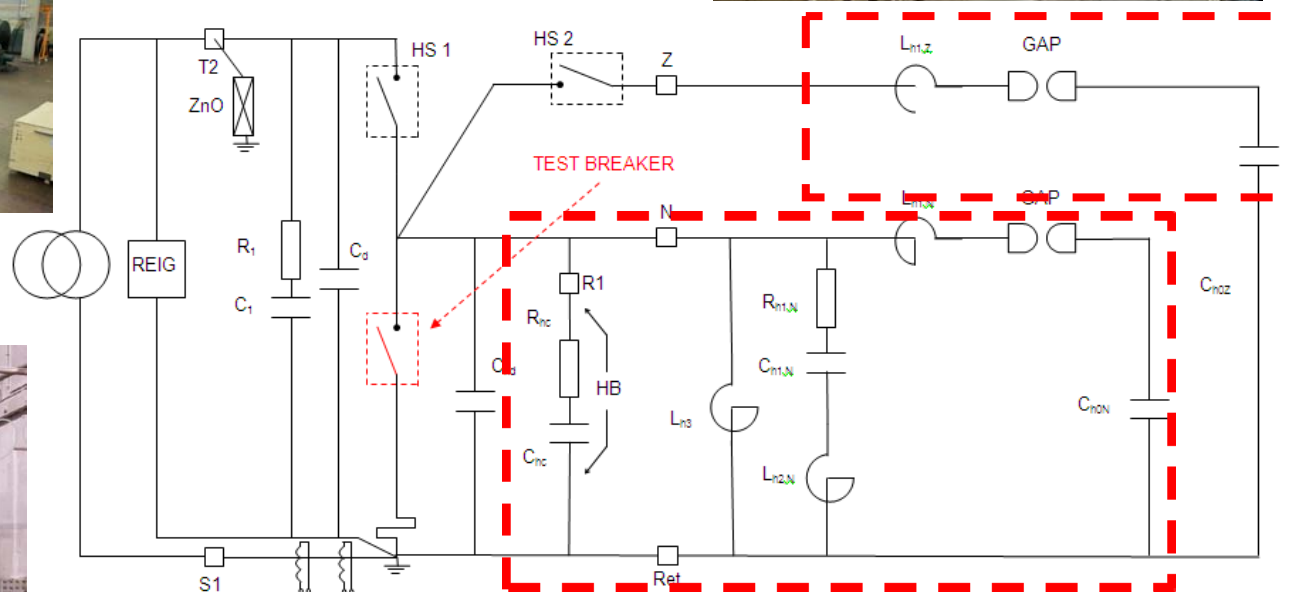
Russian 110 kV 40 kA circuit-breaker

- Испытания пройдены успешно

Passed tests successfully

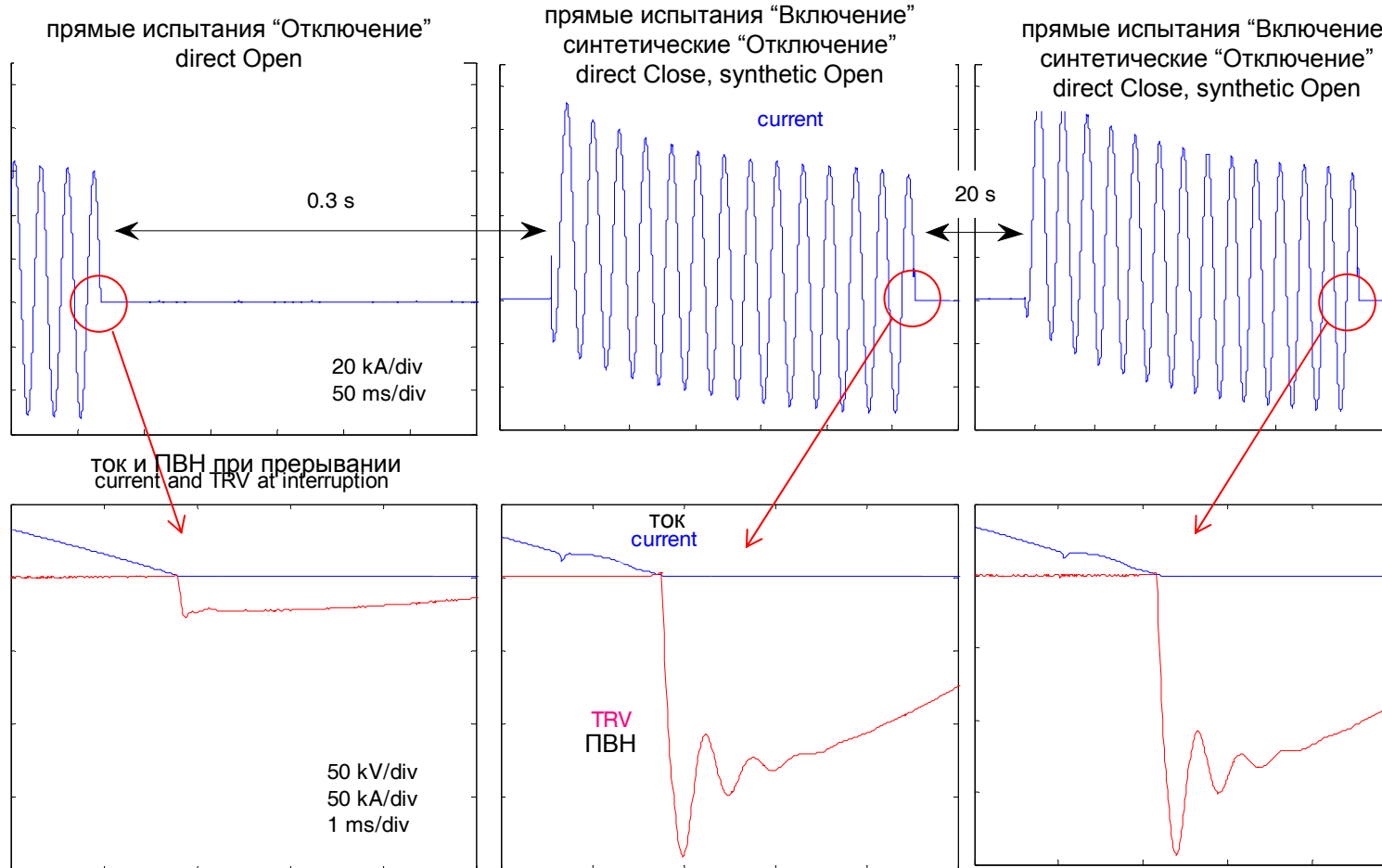
Рабочая цепь при испытаниях на соответствие ГОСТ

Test circuit for GOST-related tests



Стратегия испытаний на соответствие стандартам ГОСТ

Test strategy for GOST-related tests



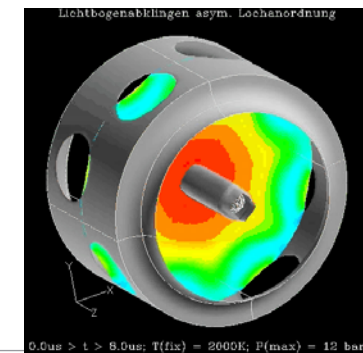
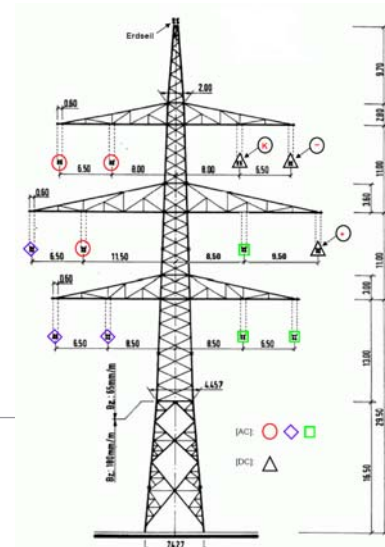
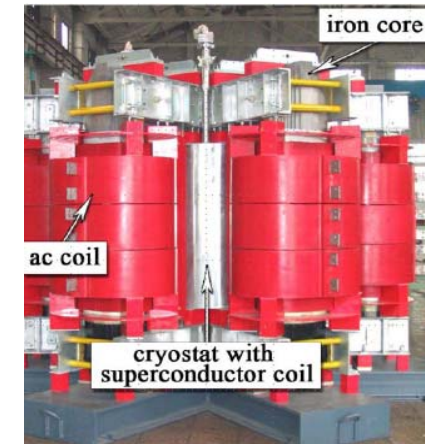
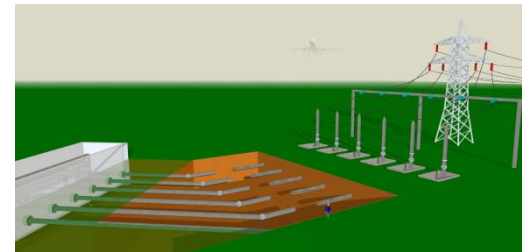
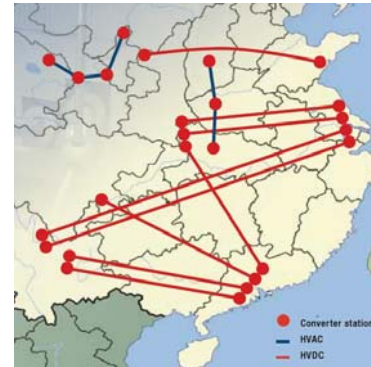
UpGrid Mosco
Oct. 30, 2013

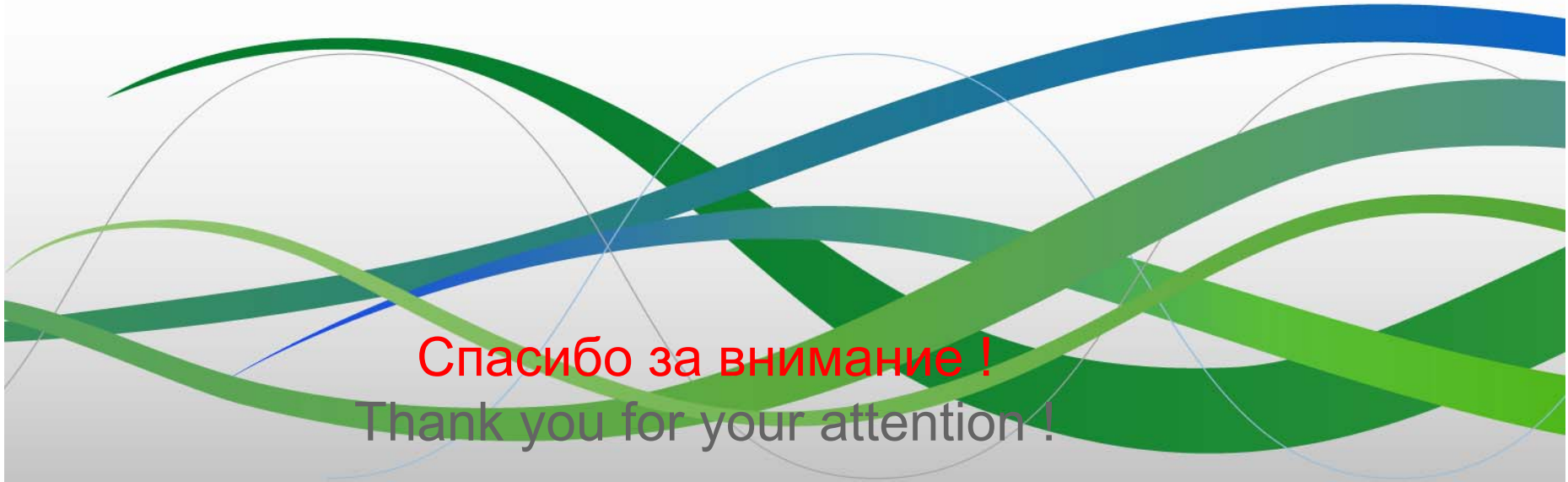


Обсуждаемые перспективные инновации

Long-term innovations considered

- **Высоковольтные испытания оборудования постоянного тока**
HV DC testing.
 - Выходит на арену технологии преобразователей напряжения (VSC)
VSC technology now breaking through
 - Компоненты сетей морского базирования
off-shore grid components
- **Суперсеть AC/DC**
Supergrid AC/DC
- **Испытания компонентов Smart Grid**
Smart grid component testing
 - Оборудование силовой электроники
Power electronics devices
 - Накопители энергии большой ёмкости
large energy storage modules
- **Замещение элегазового оборудования**
SF6 replacement
 - ВВ вакуумные выключатели
High-voltage vacuum switchgear
- **Замена тестирования моделированием**
Replacement of testing by simulation
 - лептоп или топлеб?
- laptop or toplab?
- **Технологии использующие сверхпроводимость**
Superconductivity technology
 - ограничители тока
- fault current limitation
- **неэлектрическая передача данных**
non-electrical data communication





Спасибо за внимание !
Thank you for your attention !

End



До испытаний
before test



После испытаний
after test

