

Рациональный выбор режима нейтрали с учетом практического опыта и положений нормативно- технической документации



Ширковец Андрей Игоревич,
ООО «Болид», Новосибирск
15.04.2025



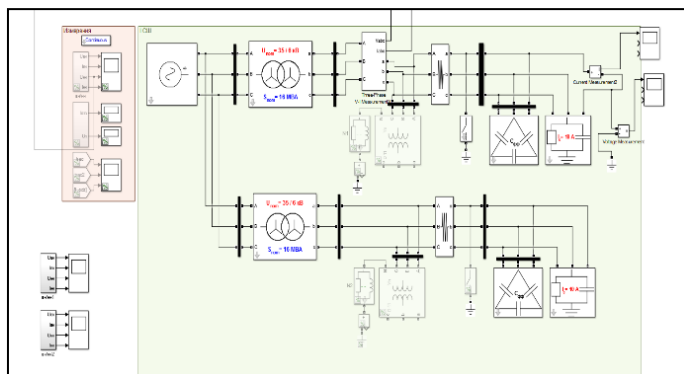
Проектирование
и строительство

Решения по защите
от перенапряжений



Натурное обследование
электрических сетей

НИР и НИОКР



Релейная защита от ОЗЗ



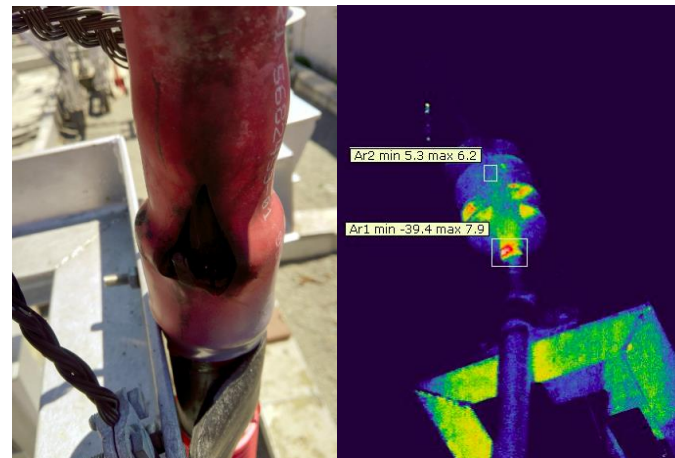
Диагностирование КЛ до 35 кВ

Объективные факторы

1. Внедрение нового оборудования с твердой изоляцией (СПЭ, ЭПР кабели, литые ТН и силовые трансформаторы, сухие ТОР)
2. Небольшие фактические запасы по электрической прочности оборудования с витковой изоляцией
3. Необходимость глубокого ограничения внутренних перенапряжений
4. Растущие требования к надежности электроснабжения и ПКЭ
5. Применение различной преобразовательной техники, искажающей питающее напряжение.

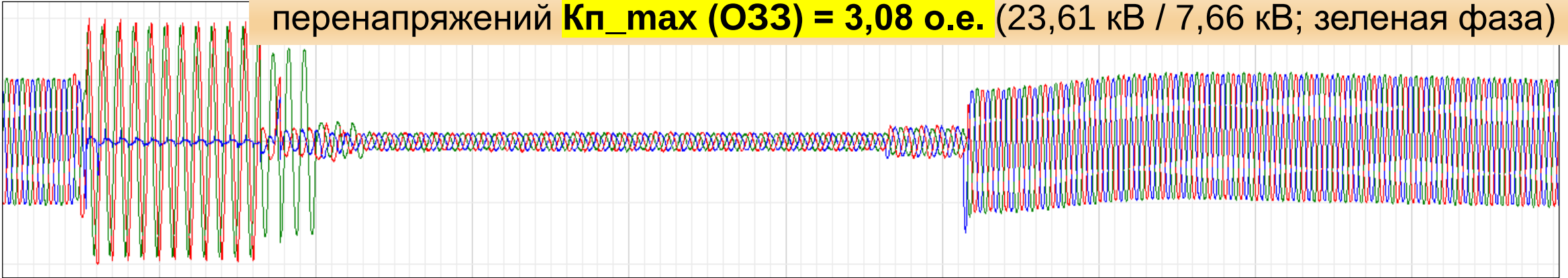
Таблица 1.10.2. Допустимые уровни внутренних перенапряжений для электрических аппаратов напряжением 6-35 кВ

Сеть $U_{ном}, \text{кВ}$	Параметр	Вид оборудования			
		Аппараты, изоляторы		Трансформаторы	Кабели
		Фарфор	Другие		
6 кВ	$U_{исп}, \text{кВ}$	32,0	28,8	22,5	14,2
	Кп (доп.)	7,6	6,92	5,4	3,4
10 кВ	$U_{исп}, \text{кВ}$	42,0	37,8	35,0	23,0
	Кп (доп.)	6,0	5,4	5,0	3,3
35 кВ	$U_{исп}, \text{кВ}$	95,0	85,5	76,5	65
	Кп (доп.)	3,9	3,5	3,15	2,67

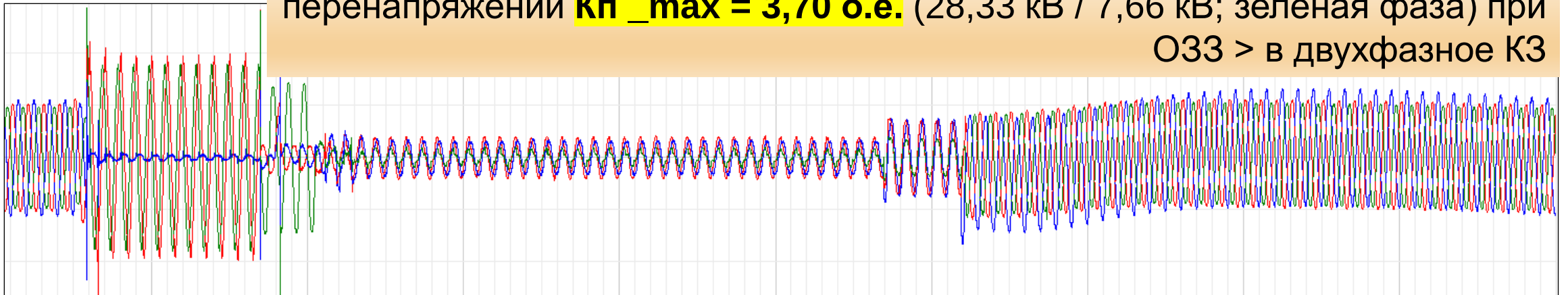


Пример зарегистрированных осциллограмм в полосе частот от 20 Гц до 50 кГц

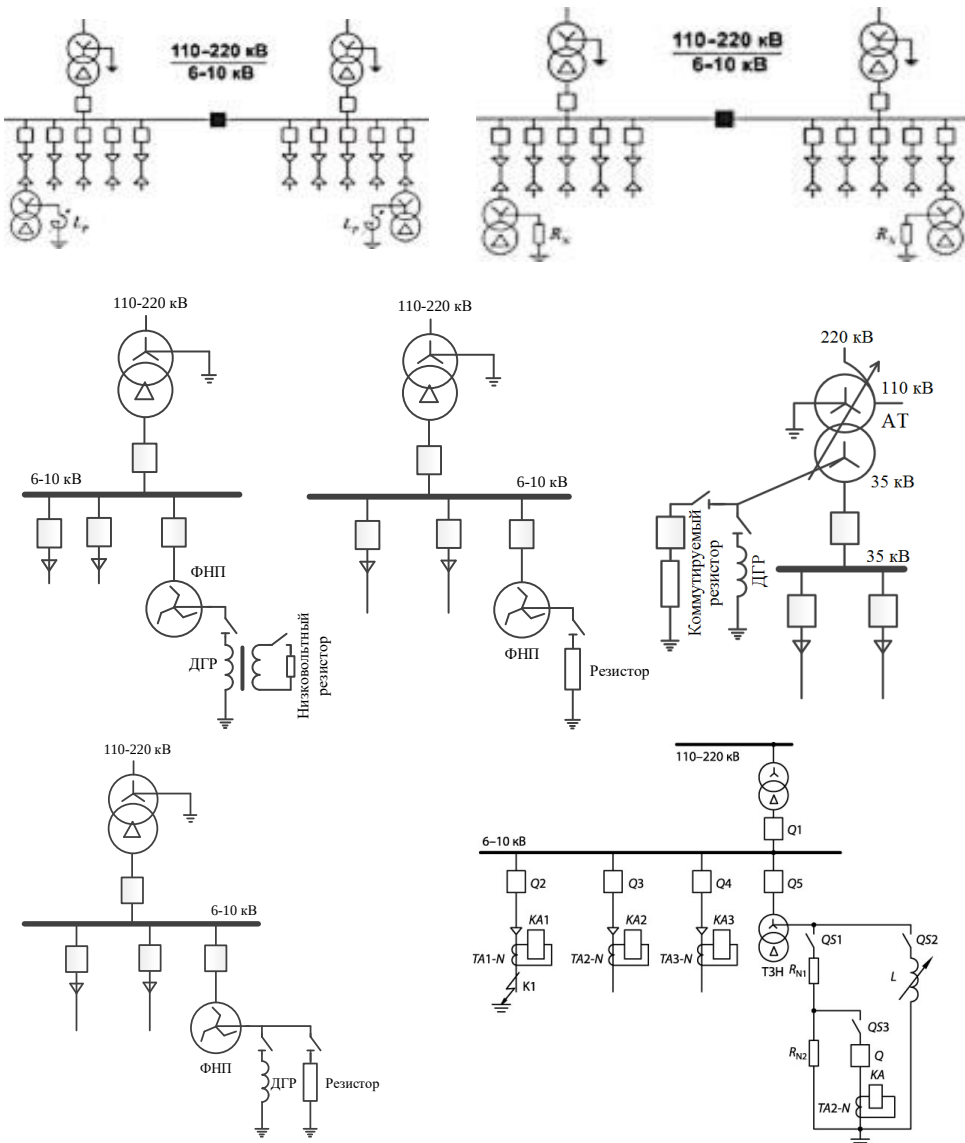
а) Осциллограмма аварийного события 1 с.ш. 10 кВ, уровень перенапряжений **Кп_max (ОЗЗ) = 3,08 о.е.** (23,61 кВ / 7,66 кВ; зеленая фаза)



б) Осциллограмма аварийного события 2 с.ш. 10 кВ, уровень перенапряжений **Кп_max = 3,70 о.е.** (28,33 кВ / 7,66 кВ; зеленая фаза) при ОЗЗ > в двухфазное КЗ



Сложность выбора режима нейтрали

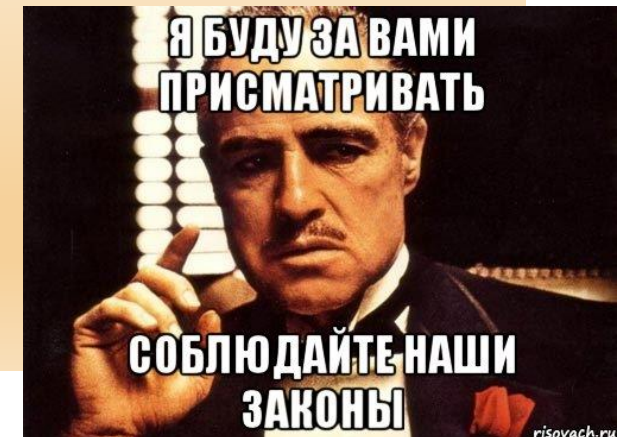


1. Кабельные и смешанные сети 6-35 кВ часто имеют большую суммарную протяженность линий - 20-30 км и более, что в развитых сетях дает емкостные токи 50...100 А на секцию, не удивить уже и $I_c = 100...500$ А.
2. Высокая протяженность сетей 6-35 кВ за счет распределенности дефектов (заводских и монтажных, на строительной длине и в муфтах) повышает риски отказов.
3. С одной стороны, ПТЭ ЭСС РФ требует компенсации при $I_c \geq 10$ А (пп. 619), с другой - если в сети есть СПЭ-кабели, предлагается быстро отключать ОЗЗ (тот же пп. 619). Это взаимоисключающие требования.
4. Повсеместно внедряется силовое оборудование с твердой изоляцией - СПЭ-кабели, литые ТН и силовые трансформаторы КТП, сухие ТОР. Нужен особый подход - быстрое отключения повреждения: «держать «землю» = увеличивать риск КЗ, обширного повреждения дугой.

Российская НТД федерального уровня (режим заземления нейтрали, защита от перенапряжений)

Нормативно-техническое регулирование в отрасли реализовано на основе федерального закона «Об электроэнергетике» от 26.03.2003 №35-ФЗ, а также созданных на основе многолетнего опыта правил (ПУЭ и ПТЭ), выполнение которых контролируется органами Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор).

1. ПУЭ 7 ред. (2003 г.), пп. 1.2.16, пп. 4.2.66 (применимость документа?)
2. Положение ПАО «Россети» «О единой технической политике», утверждено Советом директоров Общества (протокол от 28.12.2024 № 673), **п.8.1.6.2.1 «Электрические сети 3-35 кВ должны работать с изолированной, а также с заземленной через резистор или дугогасящий реактор нейтралью»**
3. ПТЭ электрических станций и сетей РФ (2023 г.), пп.619 - 626
4. РД 34.20.179 (ТИ 34-70-070-87) Типовая инструкция по компенсации емкостного тока замыкания на землю в электрических сетях 6-35 кВ
5. Руководство по защите электрических сетей 6 - 1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений (РД 153-34.3-35.125-99)



Новые ПТЭ ЭСС РФ, введены с 07.03.2023: нет изолированной нейтрали?!

621. Компенсация емкостного тока замыкания на землю дугогасящими реакторами должна применяться при емкостных токах, превышающих следующие значения:

- при номинальном напряжении сети 6 кВ – 30 А;
- при номинальном напряжении сети 10 кВ – 20 А;
- при номинальном напряжении сети 15 – 20 кВ – 15 А;
- при номинальном напряжении сети 35 кВ и выше – 10 А.

В сетях СН напряжением 6 кВ блочных электростанций допускается режим работы с заземлением нейтрали сети через резистор. В цепях генераторного напряжения при обосновании соответствующими расчетами допускается режим работы с изолированной нейтралью.

В сетях напряжениям 6 – 35 кВ с ВЛ на железобетонных и металлических опорах должны использоваться дугогасящие реакторы при емкостном токе замыкания на землю более 10 А. Допускается режим работы нейтрали через низкоомный резистор с отключением присоединения с однофазным замыканием на землю.

619. Для уменьшения кратности перенапряжений при однофазных замыканиях на землю, организации селективной работы релейной защиты и повышения электробезопасности при замыканиях на землю в сетях с малыми токами замыкания на землю (до 10 А) должны применяться:

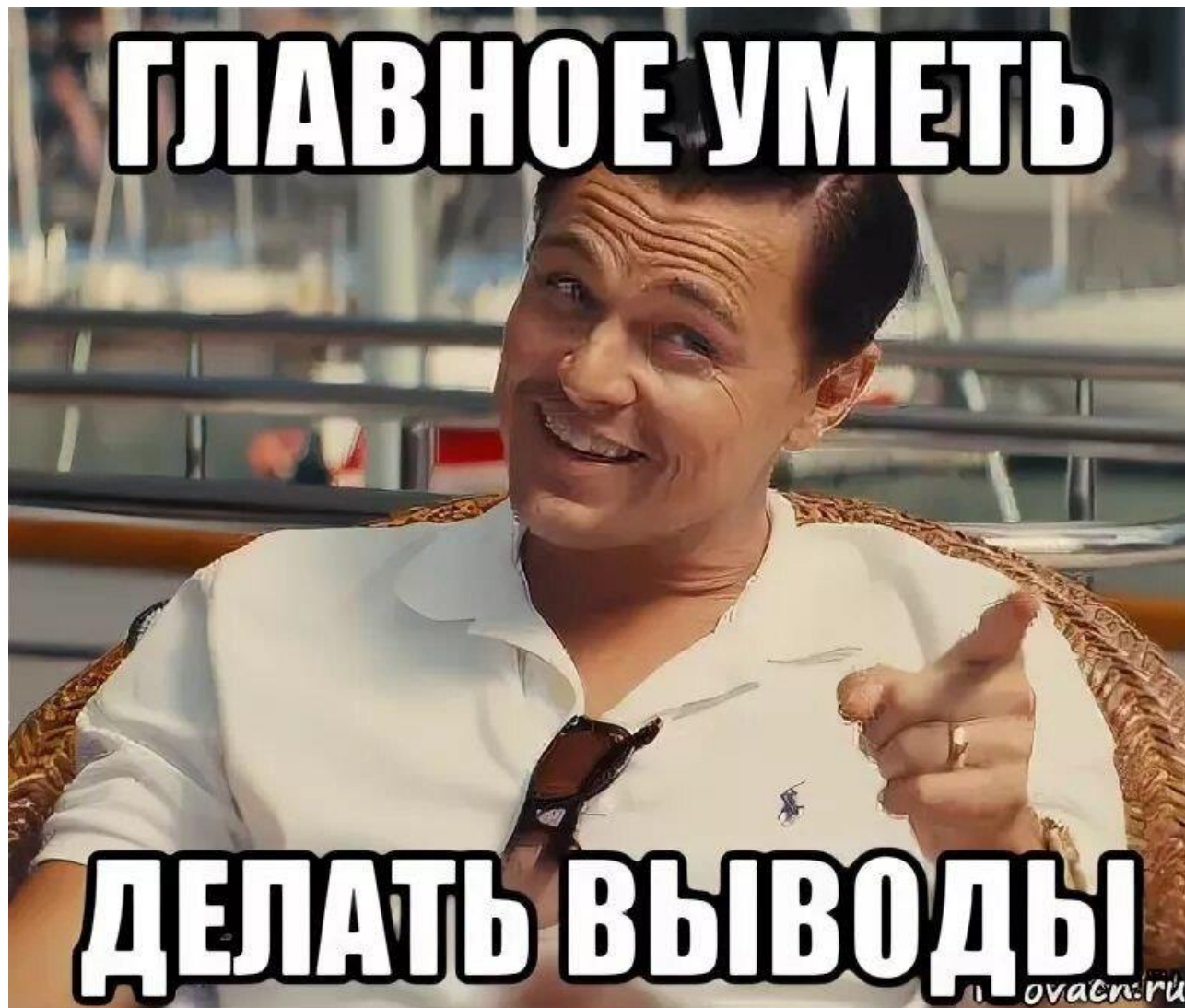
- высокоомное резистивное заземление нейтрали;
- низкоомное резистивное заземление нейтрали;
- средства селективного определения присоединения или его участка с однофазным замыканием на землю совместно с управляемыми коммутационными аппаратами, позволяющими отключать присоединение или участок присоединения с однофазным замыканием на землю.

Высокоомное резистивное заземление нейтрали допускается применять в случае, если значение тока замыкания на землю не превышает значения, указанные в пункте 621 Правил.

При высокоомном резистивном заземлении нейтрали сопротивление резистора должно выбираться из условия, чтобы значение активной составляющей тока замыкания на землю было больше или равно емкостной составляющей тока замыкания на землю.

Низкоомное резистивное заземление нейтрали следует применять в случаях, когда однофазное замыкание на землю должно быть селективно отключено в течение минимально возможного времени, а также при наличии в электрической сети силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. При этом ток в нейтрали должен быть достаточным для работы релейной защиты на отключение.

В электрических сетях, кроме электрических сетей с низкоомным резистивным заземлением, допускается работа ВЛ и КЛ с замыканием на землю до устранения повреждения.



СТО Газпром 2006 г.: все было просто и понятно

Таблица 1 – Выбор режима заземления нейтрали сетей 6 и 10 кВ

ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО “ГАЗПРОМ”

СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ

ДОКУМЕНТЫ НОРМАТИВНЫЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ,
СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ
ОАО “ГАЗПРОМ”

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ПО ВЫБОРУ РЕЖИМА ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ
В СЕТЯХ НАПЯЖЕНИЕМ 6 и 10 кВ ДОЧЕРНИХ ОБЩЕСТВ
И ОРГАНИЗАЦИЙ ОАО “ГАЗПРОМ”

СТО ГАЗПРОМ 2-1.11-070-2006

Издание официальное

ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО “ГАЗПРОМ”

Общество с ограниченной ответственностью “Научно-исследовательский институт
природных газов и газовых технологий — ВНИИГАЗ”

Общество с ограниченной ответственностью
“Информационно-рекламный центр газовой промышленности”

Москва 2006

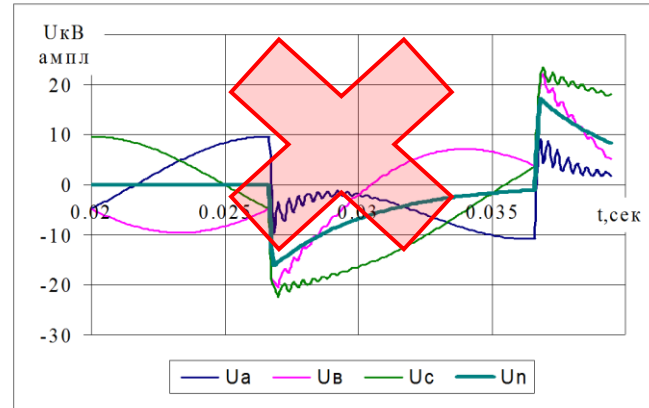
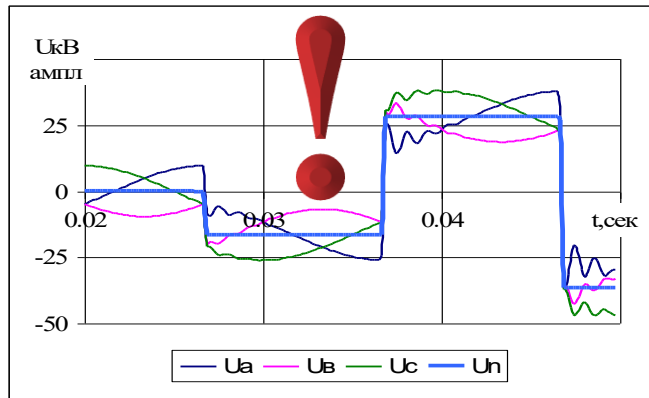
Значение I_c	Характеристика сети	Рекомендуемый режим заземления нейтрали сети	
		при действии релейной защиты на сигнал (без отключения присоединения с ОЗЗ)	при действии релейной защиты на отключение присоединения с ОЗЗ
$I_c \leq 5 \text{ A}$	A*	РУ 6 и 10 кВ электроприводных КС; распределительные сети 6 и 10 кВ ЭСН; питающие высоковольтные сети буровых установок; сети 6 и 10 кВ электроснабжения подземных хранилищ газа	Высокоомное заземление нейтрали сети $I_R \approx I_c$. В схемах электроприводных КС обязательна гальваническая развязка вдольтрассовых ВЛ с шинами 10 кВ
	B**	РУ 6 и 10 кВ газотурбинных КС; сети 6 и 10 кВ систем электроснабжения газовых промыслов и промплощадок	Высокоомное заземление нейтрали сети $I_R \approx I_c$.
$5 \text{ A} < I_c$ $I_c < 20 \text{ A}$	A	Распределительные сети 6 и 10 кВ ЭСН; сети 6 и 10 кВ с комбинированным питанием от энергосистемы и ЭСН	Высокоомный резистор в нейтрали генератора блока генератор-трансформатор; высокоомный резистор в нейтрали ТЗН (для неблочных схем); точная компенсация тока ОЗЗ настраиваемым дугогасящим реактором в нейтрали сети с подключенным параллельно реактору высокоомным резистором (в составе реактора рекомендуется использовать устройство определения поврежденного присоединения)
$5 \text{ A} < I_c$ $I_c < 20 \text{ A}$	B	Сети 6 и 10 кВ питания жилых поселков и промзоны	Высокоомный резистор в нейтрали ТЗН. Точная компенсация тока ОЗЗ настраиваемым дугогасящим реактором в нейтрали сети с подключенным параллельно реактору высокоомным резистором (в составе реактора рекомендуется использовать устройство определения поврежденного присоединения)

Окончание таблицы 1

Значение I_c	Характеристика сети	Рекомендуемый режим заземления нейтрали сети	
		при действии релейной защиты на сигнал (без отключения присоединения с ОЗЗ)	при действии релейной защиты на отключение присоединения с ОЗЗ
$I_c \geq 20 \text{ A}$	A	Сети 6 и 10 кВ газоперерабатывающих заводов. Разветвленные сети 6 и 10 кВ с комбинированным питанием от энергосистем и электростанций СН	Точная компенсация тока ОЗЗ настраиваемым дугогасящим реактором в нейтрали сети с подключенным параллельно реактору высокоомным резистором (в составе реактора рекомендуется использовать устройство определения поврежденного присоединения). Применение разделительного трансформатора
	B	Разветвленные сети 6 и 10 кВ питания жилых поселков и промзоны	Точная компенсация тока ОЗЗ настраиваемым дугогасящим реактором в нейтрали сети с подключенным параллельно реактору высокоомным резистором (в составе реактора рекомендуется использовать устройство определения поврежденного присоединения). Применение разделительного трансформатора
A* — с вращающимися высоковольтными машинами B** — без вращающихся машин			

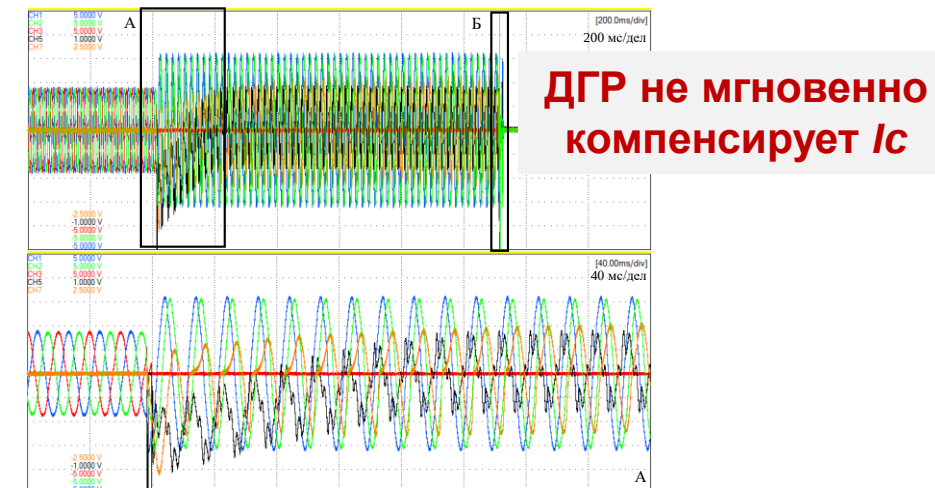
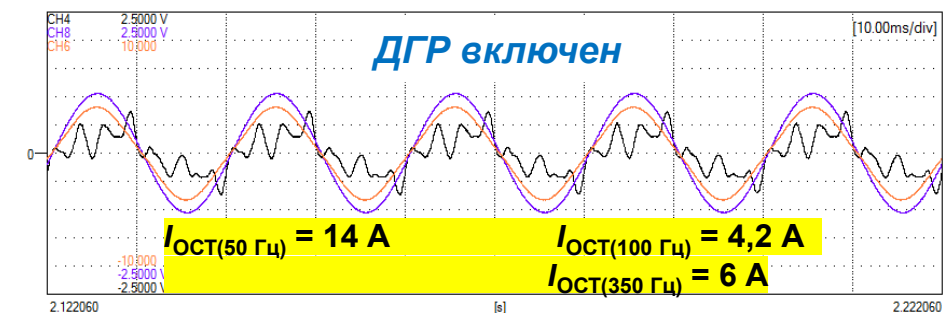
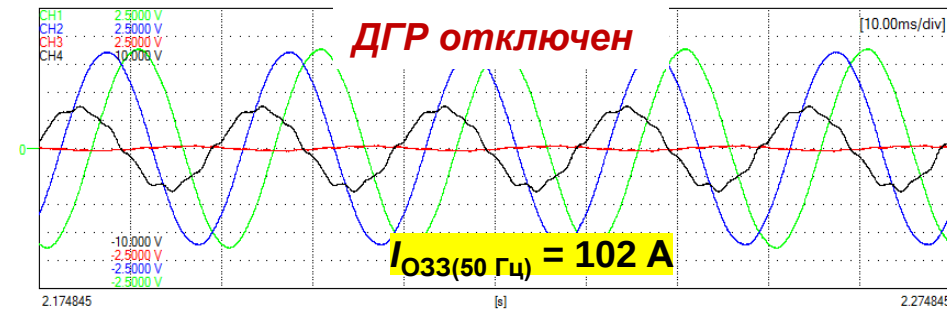
Изолированная нейтраль

- ❑ При замыкании на землю перенапряжения достигают 3,2-3,5 $U_{ф\max}$ (10 кВ - 26...29 кВ), ограничены только естественной проводимостью изоляции и межфазной емкостью
- ❑ Релейная защита от ОЗЗ не работает либо работает неселективно
- ❑ Все негативные эффекты режима однофазного замыкания суммируются:
 - эскалация перенапряжений в циклах зажигания-погасания дуги
 - феррорезонанс и отказ ТН
 - переход ОЗЗ в междуфазное КЗ, множественные повреждения КЛ
 - опасность электропоражения людей и животных (воздушные ЛЭП), разрушение бетонных опор
 - риск возникновения пожара с выгоранием ячеек и секций ЗРУ, КРУН
 - ...



Компенсация емкостного тока

1. При компенсации емкостного тока предполагается удержание «земли» условно длительное время - до 2 ч. Нередки случаи - пока идет поиск ОЗЗ, выходит из строя несколько участков КЛ, происходит развитие в КЗ
 - ❖ настроенный близко к резонансу ($I_L = I_C$) ДГР снижает уровни ВЧ перенапряжений до (2,4...2,6)Uфmax и увеличивает время бестоковой паузы между пробоями до 10-20 периодов и более
 - ❖ расстроенный более чем на 2% ДГР теряет в уровне ограничения примерно 3 кВ на каждый 1% и поэтому даже ПТЭ ЭСС регламентирует допустимую расстройку в 5% (при больших расстройках меняется характер переходного процесса, дуга гаснет и зажигается чаще)
2. Компенсация усложняет схемы релейной защиты от ОЗЗ: построить простую ТЗНП невозможно. Приходится использовать ОПФ - централизованные ЗОЗЗ, которые зачастую индицируют не 1, а 2 фидера либо неверно определяют фидер с «землей».
3. ДГР не компенсирует высшие гармоники тока ОЗЗ и его активную составляющую, которые в развитых сетях ($I_C > 100$ А) могут достигать десятков ампер - от долей до 50% $I_{OЗЗ}$.



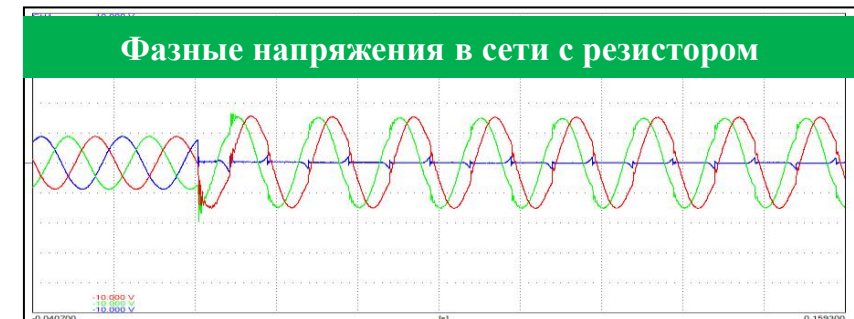
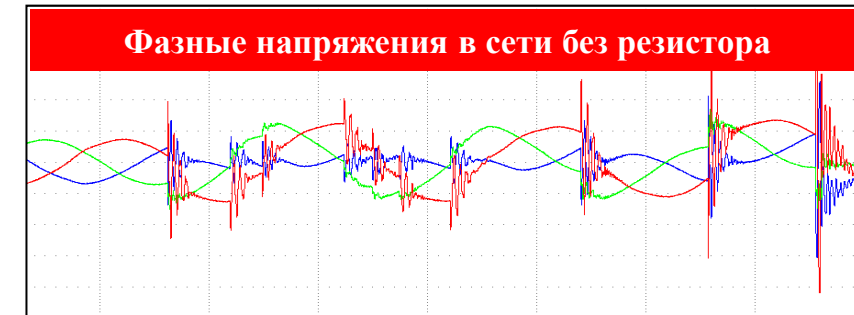
Какие плюсы у резистивного заземления, особенно с отключением ОЗЗ?

1. При включении в нейтраль сети 6-35 кВ резистора

- ❖ переходный процесс становится апериодическим, ограничение перенапряжений тем глубже, чем ниже R , уровень - не более, чем в первом пробое (при $I_r \gg I_c$ всегда ниже, порядка $U_{пер} = U_{ном}$)
- ❖ если заземляющая дуга становится устойчивой (а при НРЗ так и должно быть), то перенапряжения через 1-3 периода не превышают линейного напряжения
- ❖ на большом активном токе от R становится возможным построить простую (ненаправленную) ТЗНП и быстро отключать поврежденную КЛ с «землей»

2. Режим с отключением ОЗЗ реализует технологию «щадящей» эксплуатации, что крайне важно для оборудования с твердой изоляцией.

3. Исключается переход ОЗЗ в КЗ - ликвидируются термические и динамические воздействия на жилы КЛ и обмотки силовых тр-ров, не происходит срабатывания ресурса ВВ по токам отключения.



Кузьминская ВЭС, устройство НРЗ 35 кВ/75 Ом/270 А/10 с, емкостный ток участка сети 100-120 А



Контуры алгоритма выбора режима нейтрали

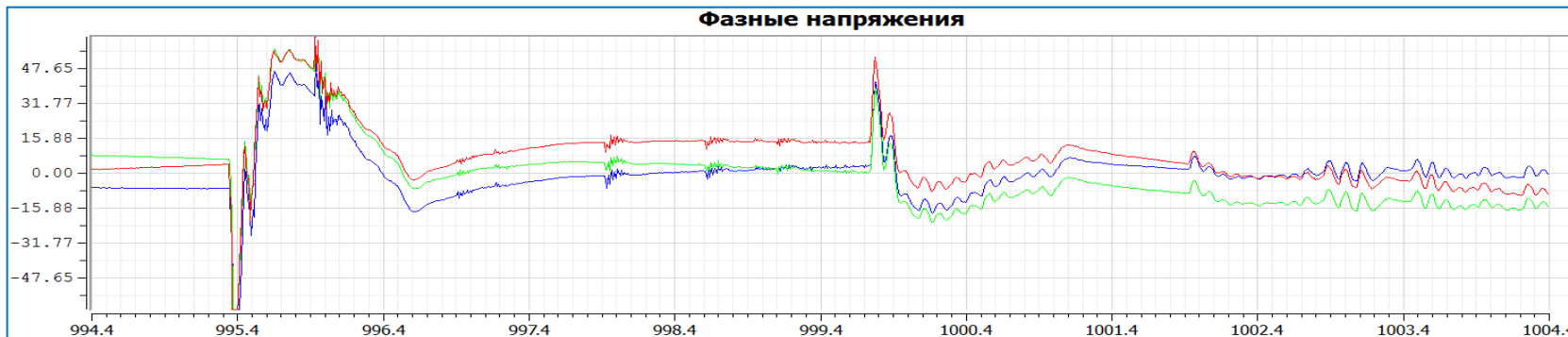
СНАЧАЛА НУЖНО РЕШИТЬ – «ДЕРЖАТЬ» ИЛИ ОТКЛЮЧАТЬ ОЗЗ?

1. Если отключать - нейтраль с низкоомными резисторами в разных вариациях (резистор, включенный постоянно или коммутируемый)
2. Если удерживать - нейтраль с высокоомным резистором, ДГР (самостоятельно или в комбинации с резисторами, включенными с первичной или вторичной стороны)
3. Схему нейтрали и параметры оборудования необходимо подбирать индивидуально для каждой сети.



ПРИМЕЧАНИЕ.

От механических повреждений один режим нейтрали не спасет



ПС 110/10 кВ:

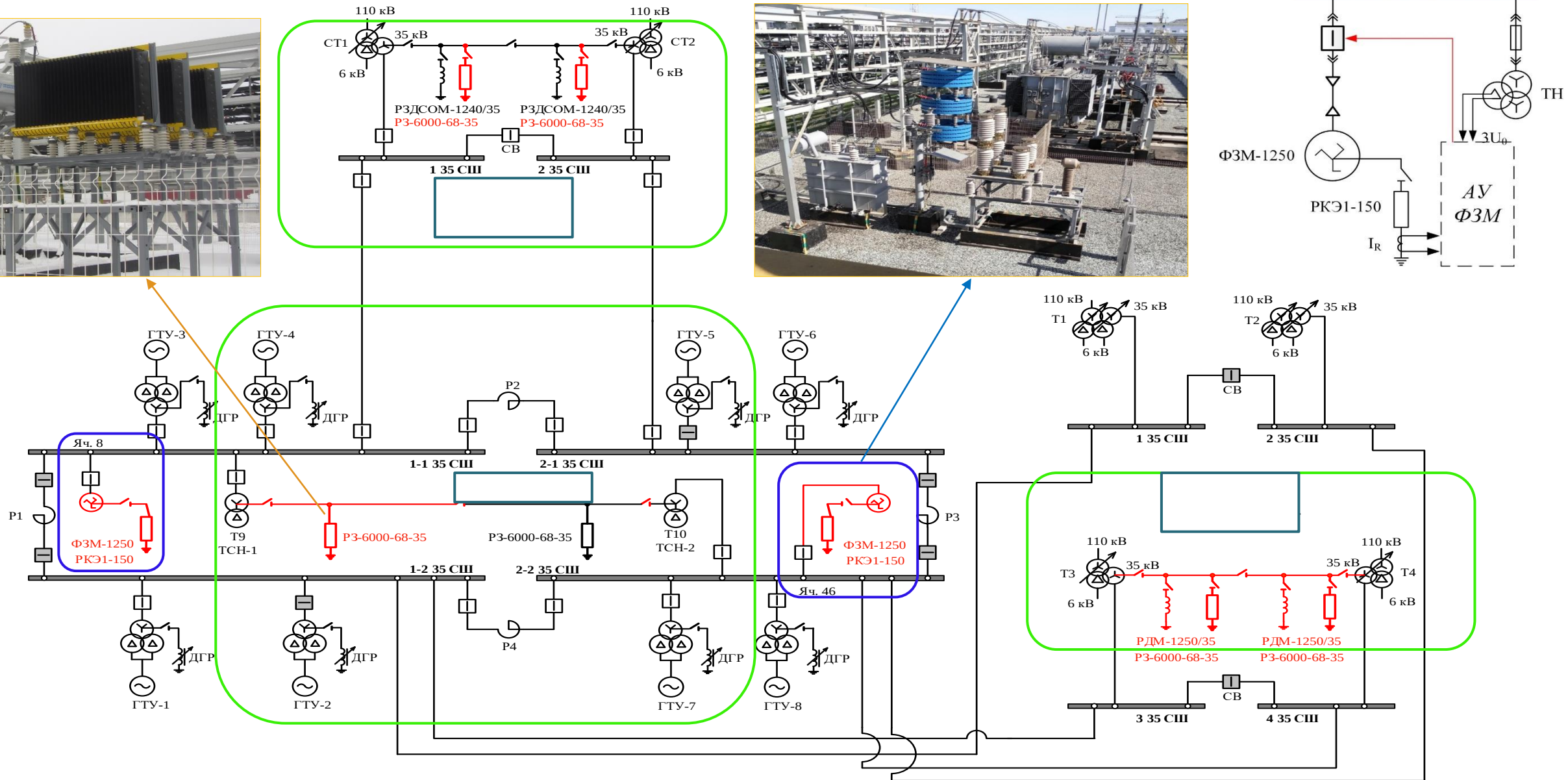
- две секции шин 10 кВ (74,8 А / 56,8 А);
- суммарная протяженность КЛ – около 100 км;
- компенсация емкостных токов.

Переходный процесс при порыве кабеля экскаватором, длительность – 30 с, максимальная кратность перенапряжений – 7,19 U_{фтах}

Заключение

1. **Необходимо индивидуально подходить к выбору режима нейтрали** с учетом технологических особенностей потребителя, вида сети, значения емкостного тока, условий резервирования и др. Проектный подход должен включать корректный расчет и формирование технических требований к оборудованию нейтрали. Нормативная документация дает широкий простор для выбора.
2. **Изолированную нейтраль** попытались исключить и не привели в ПТЭ ЭСС РФ, но в Технической политике ПАО «Россети» она по-прежнему есть.
3. **Компенсация с помощью ДГР** - классический режим нейтрали при больших емкостных токах, он рассчитан на работу сети с удержанием ОЗЗ на время его поиска и переключений потребителя.
4. **Основной целью применения резисторов является ограничение перенапряжений и обеспечение чувствительности-селективности защит от ОЗЗ.** Сегодня проектируются и вводятся в работу различные схемы с первичными резисторами: высокоомными, коммутируемыми, низкоомными. Для разных видов сетей (КЛ, ВЛ, КВЛ), с учетом норм ПТЭ ЭСС, можно подобрать оптимальный вариант.
5. **Первичен вопрос - отключать или удерживать ОЗЗ?** Для резервированных сетей с оборудованием с твердой, невосстанавливаемой изоляцией (СПЭ-кабели, литые силовые и измерительные трансформаторы) - удержание ОЗЗ нецелесообразно. Это нормативно закреплено в п. 619 новых ПТЭ ЭСС РФ, введенных с 07.03.2023.
6. **Снижение числа аварийных отключений в сети за счет правильного выбора режима нейтрали** - не только показатель эффективности выбранных технических решений, но и способ продления/обеспечения эксплуатационного ресурса оборудования сетей 6-35 кВ.

Пример сложного технического решения

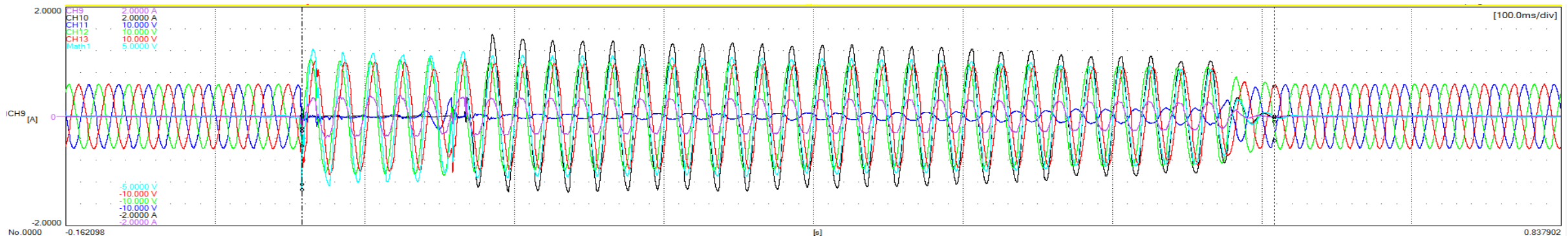


Результаты мониторинга

15.05.2018 г. - однофазное замыкание на землю на КЛ ГТУ-ТЭС - ЦРП цепь 2

05.06.2018 г. однофазное замыкание на землю на КЛ ГТУ-ТЭС - ЦРП цепь 1

Отключения штатные, сбоев в работе технологического оборудования нет



Событие 05.06.2018 г. было зафиксировано установленной системой мониторинга

Продолжительность аварийного события (от момента первого пробоя изоляции и до восстановления нормального уровня фазных напряжений) составляла 650 мс.

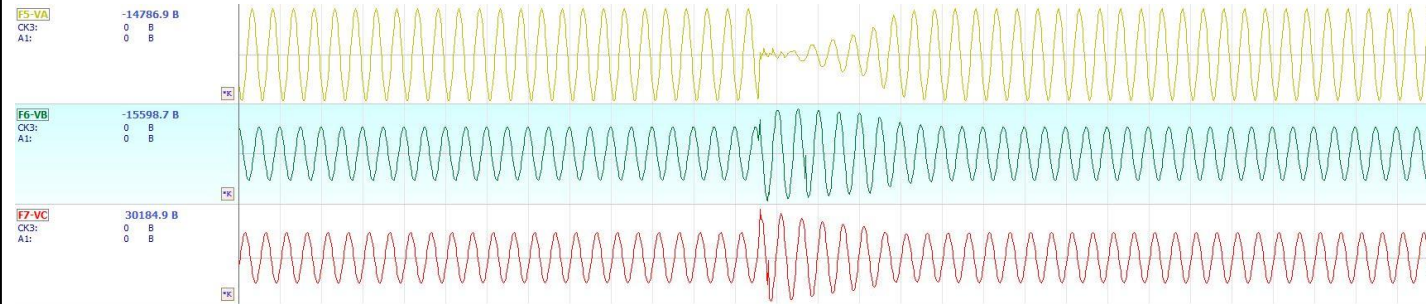
Источник: Валов В.Н., Соловых С.В., Дернов А.И., Колупаев М.В. Технология надёжной защиты электрооборудования с использованием коммутируемого низкоомного резистора в сети 35 кВ нефтеперерабатывающего предприятия. // Энергетик. - 2019. - С.30-34



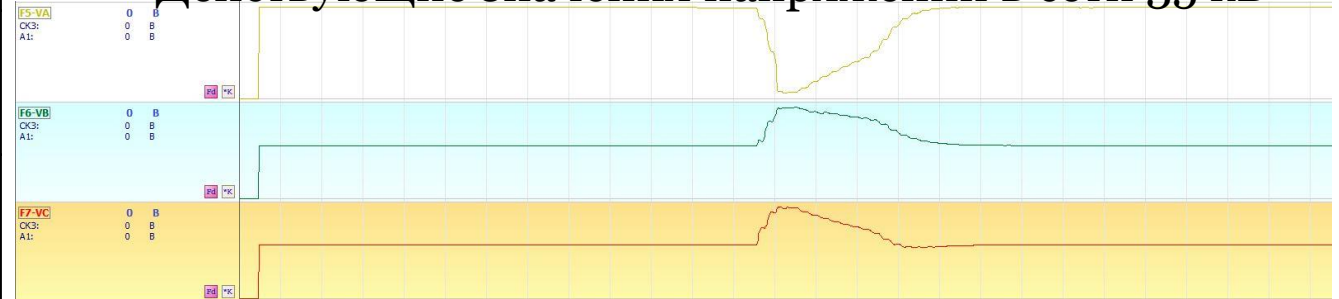
Пример работы релейной защиты в сети 35 кВ

Время	Событие
07:26:49.851	Возникновение ОЗЗ ф.А в сети 35 кВ - Снижение напряжения ф.А до 1,5 кВ относительно земли - Повышение напряжения ф.В до 36,6 кВ относительно земли - Повышение напряжения ф.С до 36,4 кВ относительно земли
07:26:49.871	Срабатывание дифференциальной защиты (ДЗЛ) КЛ 35 кВ «Устиново цепь 2» (яч. 45 КРУЭ-35 кВ)
07:26:49.872	Формирование команды на включение выключателя яч.8 «ФЗМ-1» КРУЭ-35 кВ
07:26:49.951	Автоматическое включение выключателя яч.8 «ФЗМ-1» КРУЭ-35 кВ
07:26:49.960	Отключение выключателя КЛ 35 кВ «Устиново цепь 2» (яч. 45 КРУЭ-35 кВ) от ДЗЛ
07:26:50.109	Автоматическое отключение выключателя яч.8 ФЗМ-1

Мгновенные значения напряжений в сети 35 кВ



Действующие значения напряжений в сети 35 кВ



Действующие значения токов

