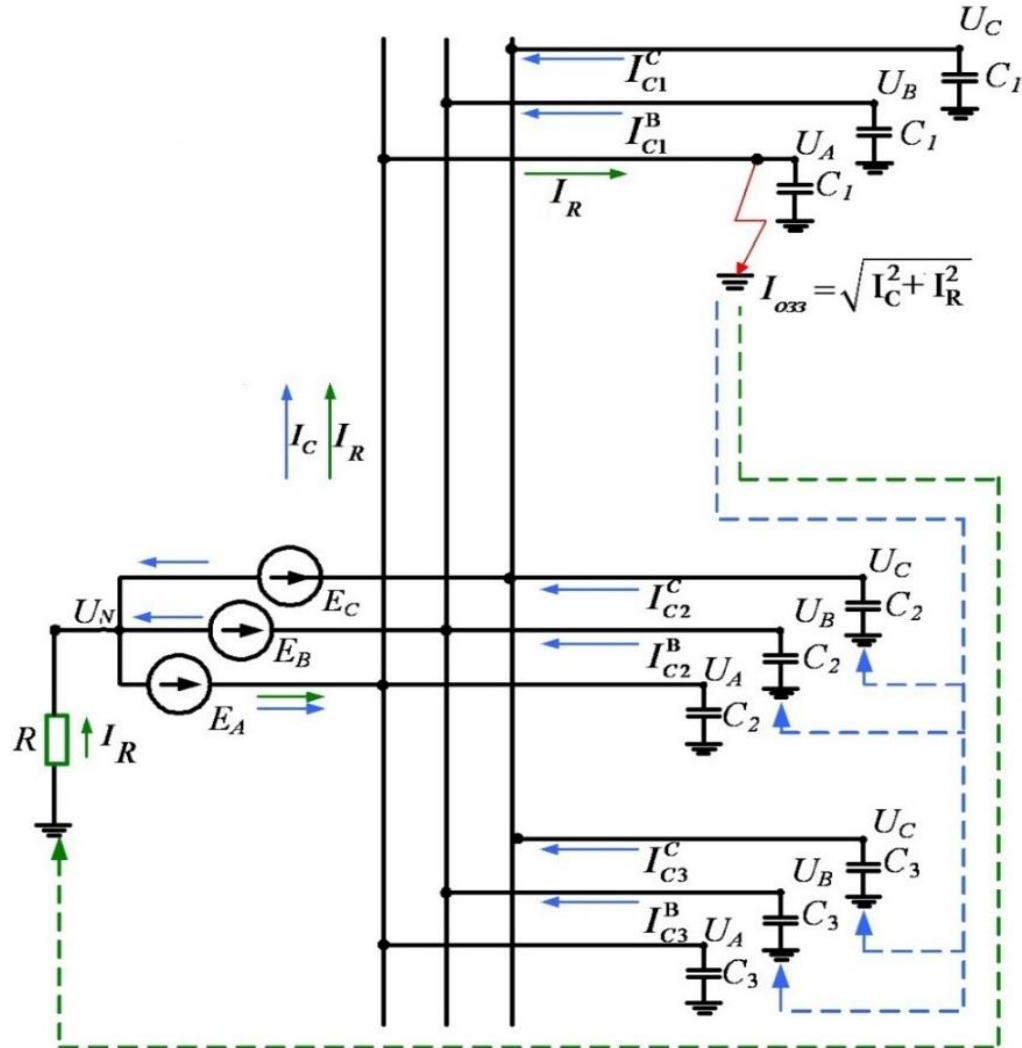




Методика расчета уставок токовой защиты от замыканий на землю в сети с низкоомным резистивным заземлением нейтрали

Ширковец Андрей Игоревич,
ООО «Болид», Новосибирск
16.04.2025

1. Виды (принципы) защит от ОЗЗ, применимые в сети с резистором



- Неселективная защита (сигнализация) от ОЗЗ по напряжению НП $3U_0$ (код ANSI 59N)
- **Ненаправленные токовые защиты по току $3I_0$ (код ANSI 50N/51N; 50G/51G)**
- **Направленная токовая защита по току $3I_0$, напряжению $3U_0$ и углу между ними (код ANSI 67N),**
- **Защиты с выделением активной составляющей $I_{OЗЗ}$**
- **Централизованные защиты от ОЗЗ:**
 - по высшему гармоническому составу тока ОЗЗ
 - по инжектируемым в контур НП составляющим не промышленной частоты
 - по анализу составляющих переходного процесса
 - по относительному сопоставлению уровней тока нулевой последовательности на разных фидерах

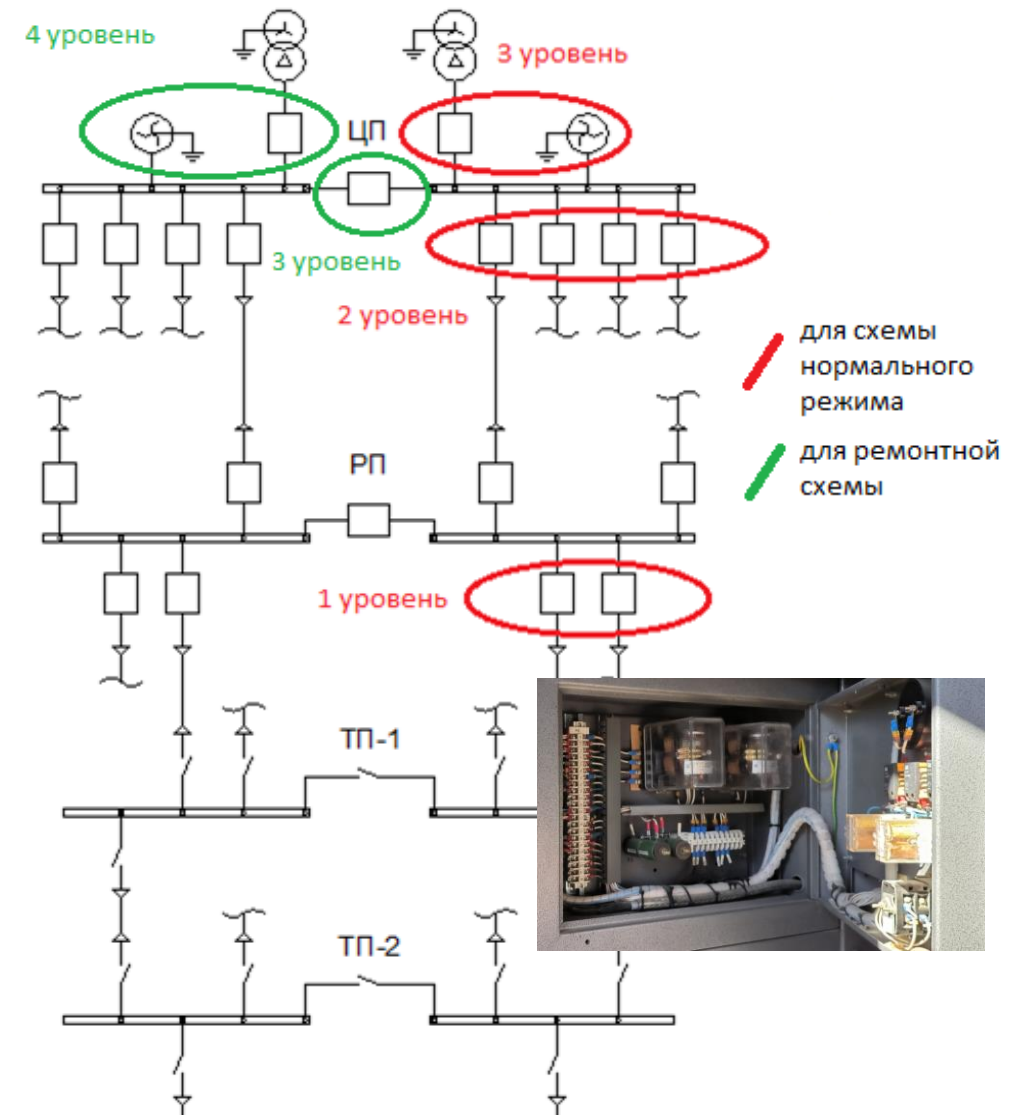
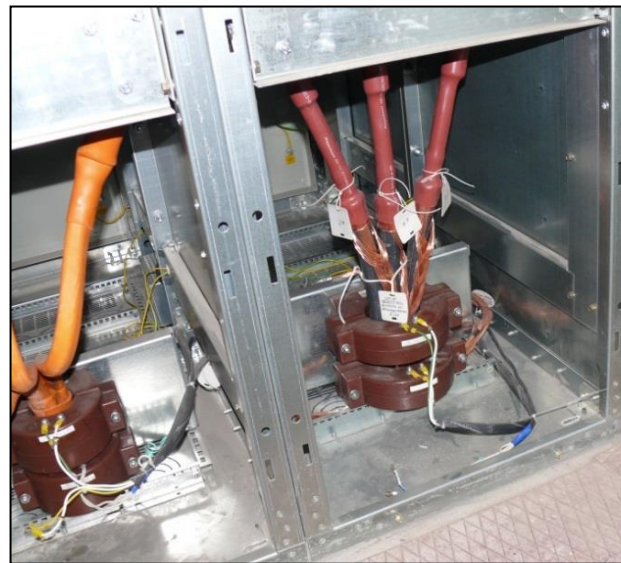
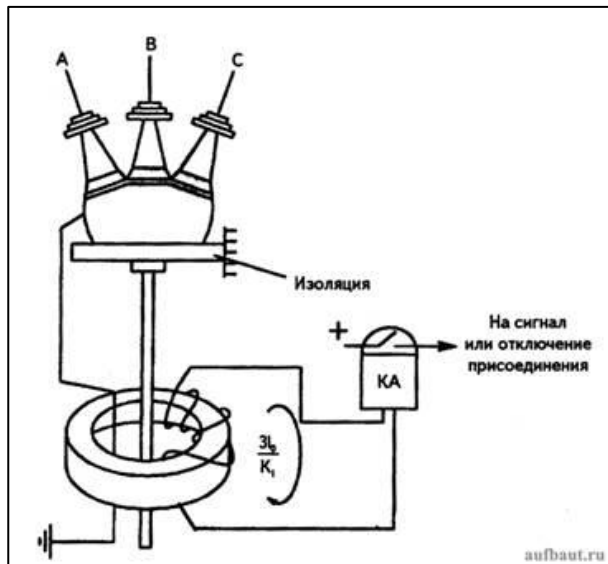
2. Разнообразие принципов работы и производителей

Заземление нейтралей Вид защиты от ОЗЗ	Изолир.	Через ДГР	ДГР+ Резистор	Низкоом. резистор
1. Ненаправленная (простая) токовая защита	±	-	±	+
2. Направленная токовая защита, защита по актив.сост.	±	-	-	+
3. ЦЗОЗЗ по высшему гармоническому составу тока	±	±	±	±
4. ЦЗОЗЗ по инжестируемым в составляющим $\neq 50$ Гц	+	+	+	+
5. ЦЗОЗЗ по анализу составляющих перех. проц.	+	+	+	+
6. ЦЗОЗЗ по относительному сопоставлению уровней тока	±	-	-	+

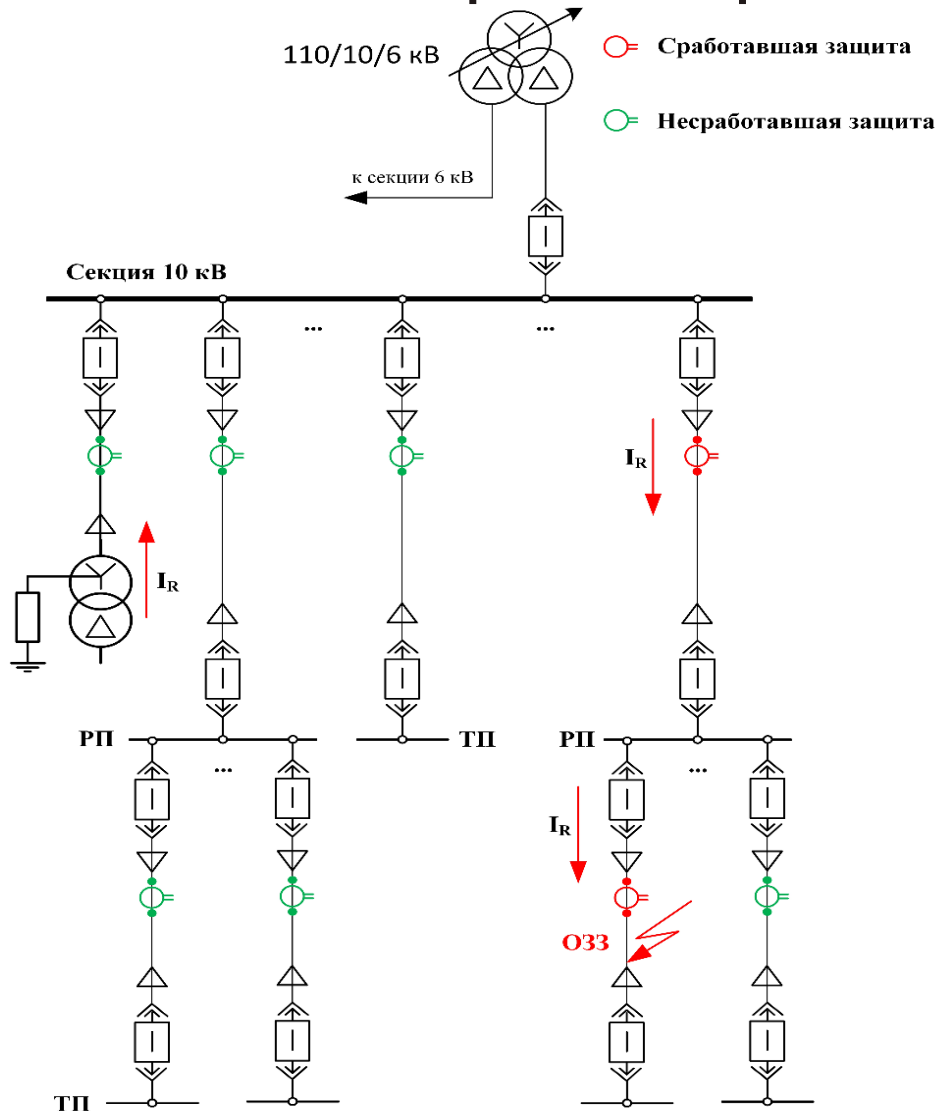
- ❖ Широкий набор функций и производителей РЗА затрудняет выбор конкретной защиты при проектировании.
- ❖ Для любого производителя РЗА это тоже сложная ситуация:
 - нужно достичь некой универсальности (обеспечить работоспособность ЗОЗЗ при разных режимах нейтрали, разных токах, разных ТТНП),
 - «прошить» новые функции в МПУРЗА несложно, но возникают вопросы конкуренции, защиты интеллектуальной собственности, проверки на надежность алгоритмов - нужны хорошие расчетные модели.

3. Ненаправленная (простая) токовая защита

- В сети с низкоомным резистором ($I_R = 100 \dots 1000 \text{ A}$) необходимую чувствительность легко обеспечить с помощью такой защиты.
- В первую очередь это относится к радиальным кабельным сетям.**
- Защита реализуется с использованием нескольких ступеней с $\Delta t = 0,3 \dots 0,5 \text{ с}$, что позволяет обеспечить селективное отключение поврежденного участка.



4. Обеспечение чувствительности защиты при выборе низкоомного резистора



Выбор сопротивления по двум критериям:

1. Перевод заземляющей дуги в устойчивую фазу горения

$$I_R \geq kI_C \text{ и } I_R = \frac{U_\Phi}{R} \Rightarrow R \leq \frac{U_\Phi}{kI_C}$$

где k — отношение активного тока резистора к ёмкостному в точке замыкания, при котором дуга горит устойчиво.

2. Обеспечение чувствительности ненаправленных токовых защит:

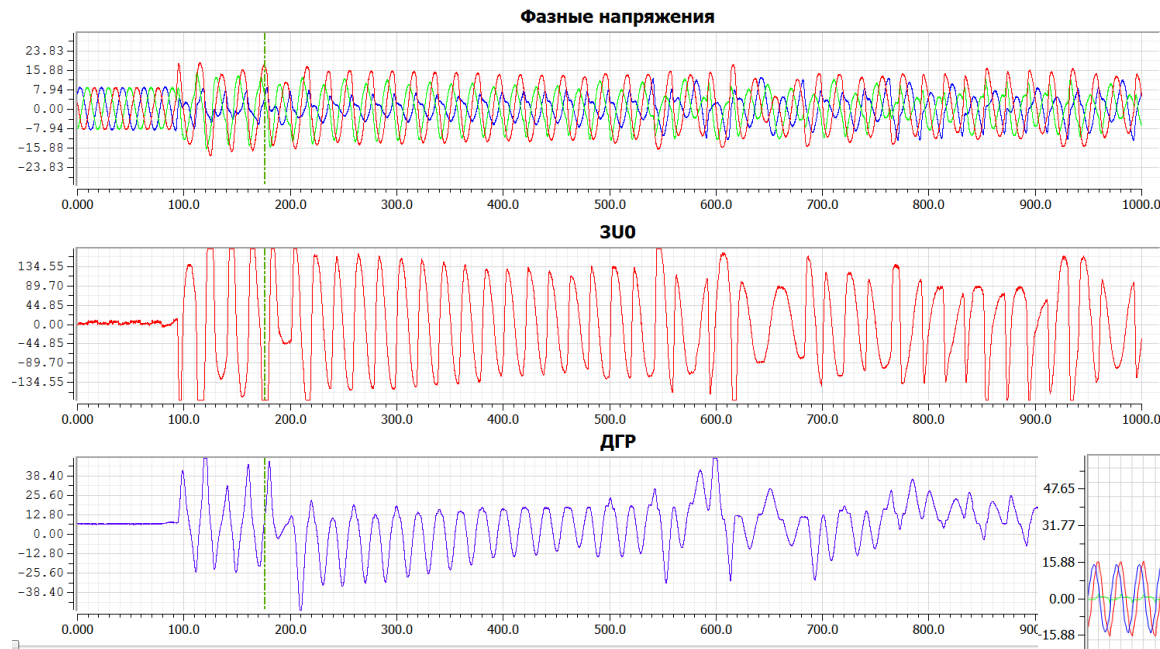
$$I_{C3} \geq k_H \cdot (k_{бр} \cdot I_{Cmax} + I_{НБ}) \quad k_\chi = \frac{I_{зашц}}{I_{C3}}$$

Стараются обеспечить коэффициент чувствительности более 1,5.

Для максимально глубокой локализации ОЗЗ

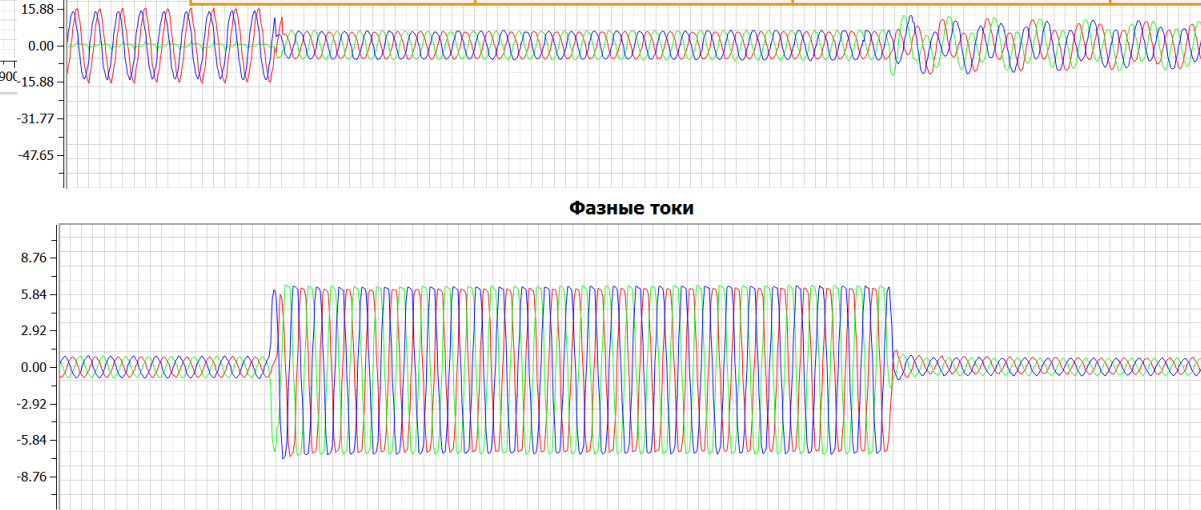
- ☐ дооснастить РП селективными защитами от ОЗЗ
- ☐ применить на ТП индикаторы тока КЗ

4.1. Неустойчивое горение дуги затрудняет работу защиты от ОЗЗ, а удержание «земли» повышает риск КЗ



Время перехода ОЗЗ–КЗ	ПС «А» (08.2012...12.2014)	ПС «Б» (08.2012...12.2014)	ПС «В» (03.2015...10.2016)
< 0,5с	9 (26,5%)	10 (50,0%)	10 (22,7%)
0,5...5 с	6 (17,6%)	2 (10,0%)	13 (29,6%)
> 5 с	19 (55,9%)	8 (40,0%)	21 (47,7%)
ИТОГО	34	20	44

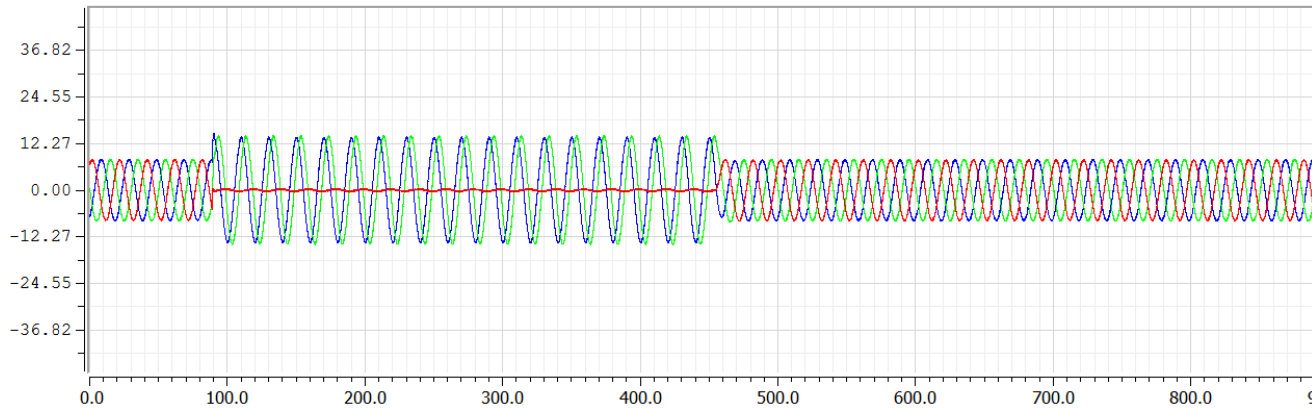
При перемежающейся дуге возможны пуск защиты по ЗУо, возврат защиты в бестоковую паузу, «плавание» угла вектора тока и неустойчивость вектора U_o относительно опорного U .



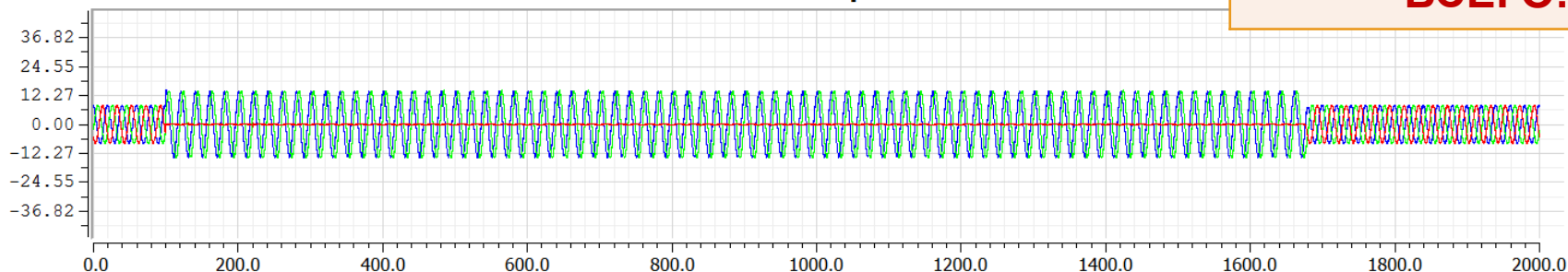
4.2. Перевод дуги в устойчивую фазу при большом активном токе

За счет резистора 50 Ом/120 А на ПС 110/10 кВ (52,2 А / 52,3 А / 39,1 А / 42,1 А) обеспечено устойчивое ОЗЗ

Фазные напряжения



Фазные напряжения



Вид события	До ввода R (26.08.2018 ... 26.08.2019)	После ввода R (26.08.2019 ... 26.08.2020)
ОЗЗ	32 (45,7%)	38 (77,5%)
ОЗЗ-КЗ	17 (24,3%)	2 (4,1%)
КЗ	21 (30,0%)	9 (18,4%)
ВСЕГО:	70	49

5. Методика расчета и выбора уставок ЗОЗЗ для отходящих линий (1)

Классический подход

(М.А. Шабад, В.А. Андреев и др.)

Уставка токовой ненаправленной защиты определяется следующим образом:

1) *Несрабатывание защиты при внешнем ОЗЗ:*

Ток срабатывания защиты от ОЗЗ кабельной линии отстраивается от собственного емкостного тока линии при замыканиях на землю на других присоединениях (отстройка от внешнего ОЗЗ).

Ток срабатывания защиты для каждого отходящего присоединения определяется по выражению:

$$I_{CЗ} \geq k_H \cdot k_{бр} \cdot I_{C.отх.}, \quad (1)$$

где $k_H=1,2$ — коэффициент надежности; $k_{бр}$ — коэффициент, учитывающий бросок ёмкостного тока в момент возникновения ОЗЗ, а также способность реле реагировать на него. При использовании для защиты от ОЗЗ современных микропроцессорных терминалов защит можно принимать значения $k_{бр}=1,5$; $I_{C.отх.}$ — собственный емкостный ток отходящего присоединения.

2) *Срабатывание (чувствительность) защиты при ОЗЗ на защищаемом присоединении:*

$$K_{ч} = \frac{I_{Заш}}{I_{CЗ}}, \quad (2)$$

где $I_{Заш} = \sqrt{(I_{CΣ} - I_{C.отх.})^2 + I_R^2}$ — полный ток ОЗЗ в сети промышленной частоты, протекающий через трансформатор тока нулевой последовательности защищаемого присоединения; $I_{CΣ}$ — суммарный емкостной ток секции сети; $I_{C.отх.}$ — собственный емкостный ток защищаемого фидера; I_R — ток резистора.

В качестве I_R следует принимать значение тока резистора, ограниченный сопротивлением нейтралеобразующего трансформатора.

Коэффициент чувствительности, согласно п.3.2.21 ПУЭ должен превышать значение 1,25 для защит кабельных линий и значение 1,5 для воздушных линий.

Предлагаемый подход

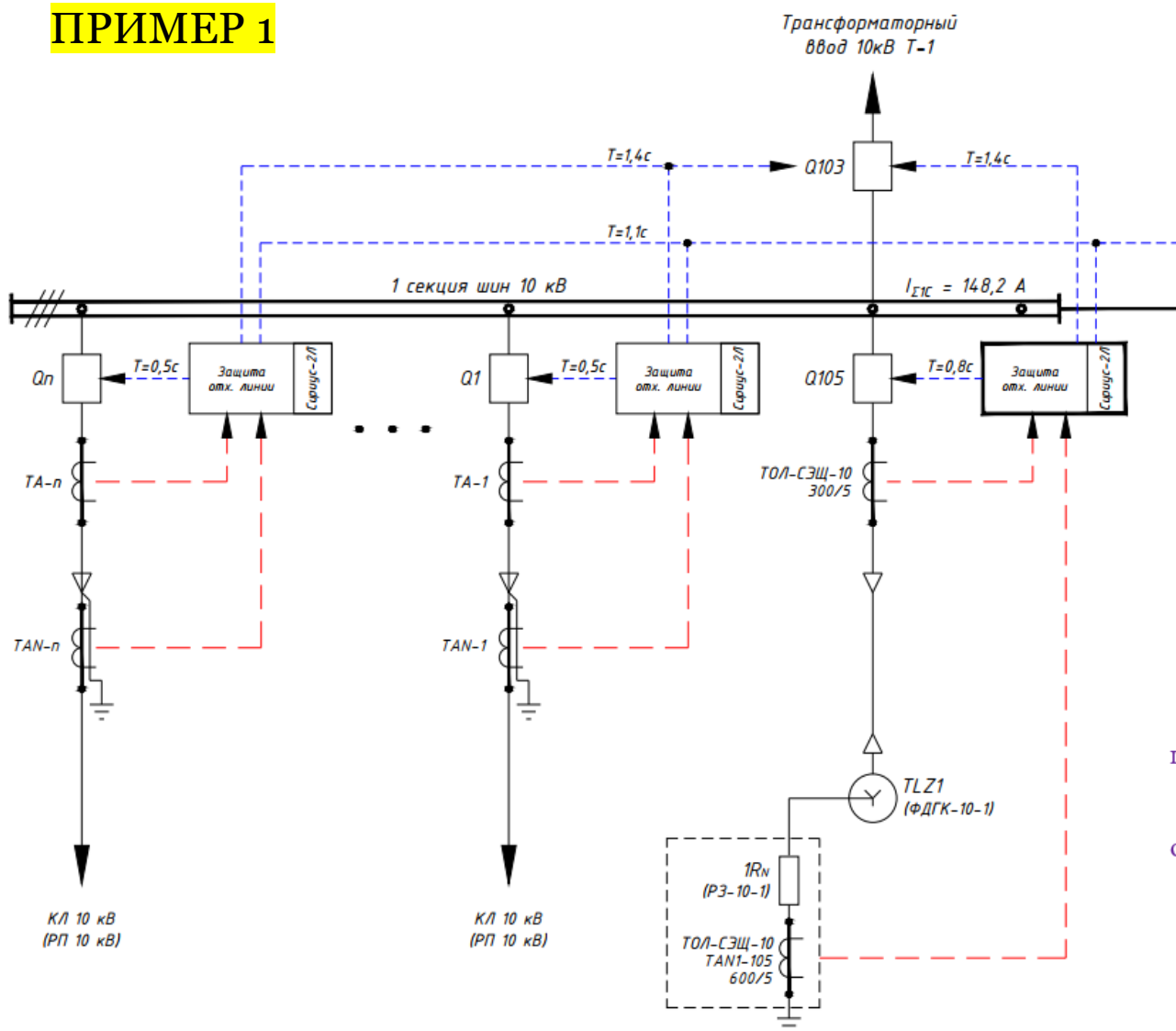
не противоречит классике

- Конфигурация сети 10(6) кВ может существенно изменяться из-за аварийных отключений и оперативных переключений в прилегающей сети.
- Суммарный емкостный ток некоторых присоединений, особенно от питающей ПС 35-110/10(6), может меняться очень заметно.
- Предлагается загрузить уставки срабатывания по току с назначенным $K_{ч} \geq 2...3$, чтобы избежать ложных срабатываний, а также для унификации и удобства наладки РЗА: можно задать равные и одинаковые значения $I_{CЗ}$ для всех фидеров ПС/РП

Критерий прост: расчет выполнить для I_{Cmax} в предельных режимах (макс. Нагрузка, макс.длина линий на фидер ПС) и проверить, чтобы расчетный $K_{ч}$ при «загруженных» уставках был $K_{ч}(норм) \geq 1,25$ для КЛ, п.3.2.21 ПУЭ-7

Выбор уставок по току ЗОЗЗ для отходящих линий

ПРИМЕР 1



Секция шин	Ёмкостной ток секции, А	Ёмкостный ток наибольшего присоединения ¹⁾ , А	$I_{\text{рогр}}, \text{А}$
1	148,2	24,7	190,5

1) Несрабатывание защиты при внешнем однофазном замыкании на землю:

Условие отстройки от собственного емкостного тока при внешнем однофазном замыкании дает возможность рассчитать минимально возможный ток срабатывания защиты, при котором защита не сработает при протекании собственного емкостного тока по этой защите в случае внешнего ОЗЗ в сети 10 кВ.

Ток срабатывания защиты определяется по формуле (1):

$$I_{\text{сз}} \geq k_H \cdot k_{\text{бр}} \cdot I_{\text{с.отх.}} = 1,2 \cdot 1,5 \cdot 24,7 = 44,46 \text{ А.}$$

2) Срабатывание (чувствительность) защиты при ОЗЗ на защищаемом присоединении:

Принимаем ток $I_{\text{сз}}$, рассчитанный по первому условию и равный 44,46 А.

Коэффициент чувствительности составит:

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{заш}}}{I_{\text{сз}}} = \frac{\sqrt{(148,2 - 24,7)^2 + 190,5^2}}{44,46} = 5,11 > 1,25.$$

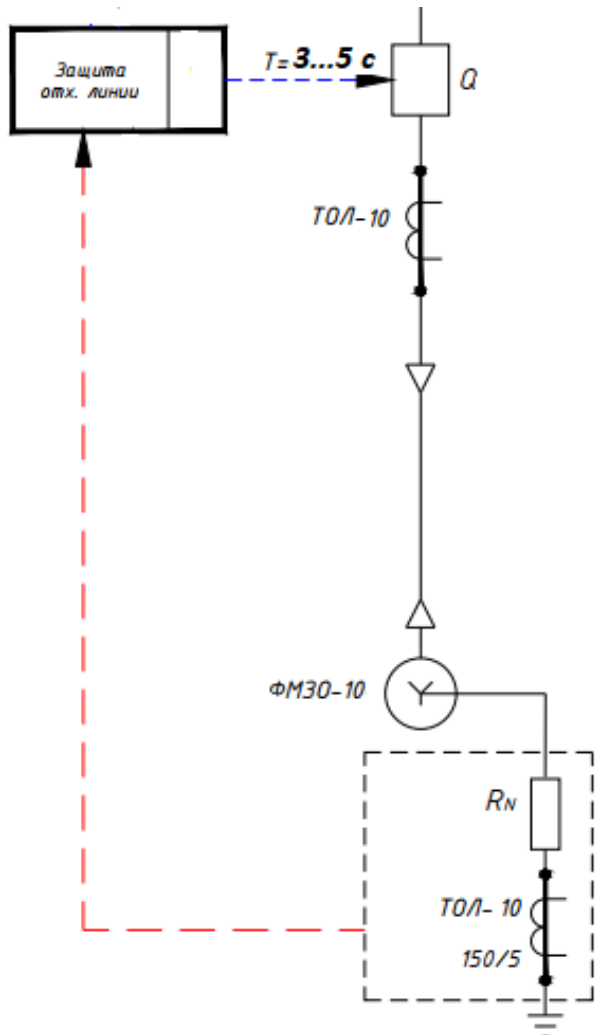
Второе условие можно интерпретировать и как наибольший ток срабатывания защиты, при котором будет обеспечиваться требуемый коэффициент чувствительности 1,25.

Тогда можно рассчитать наибольший ток срабатывания защиты, при котором еще обеспечивается $K_{\text{ч}} = 1,25$:

$$I_{\text{сз}} = \frac{I_{\text{заш}}}{K_{\text{ч}}} = \frac{\sqrt{(148,2 - 24,7)^2 + 190,5^2}}{1,25} = 181,62 \text{ А.}$$

Таким образом, при токе $I_{\text{сз}}$ находящимся в диапазоне 44,46...181,62 А будет обеспечиваться требуемый коэффициент чувствительности $K_{\text{ч}} = 1,25$.

Особенности выбора уставок 3ОЗЗ для присоединения нейтрали

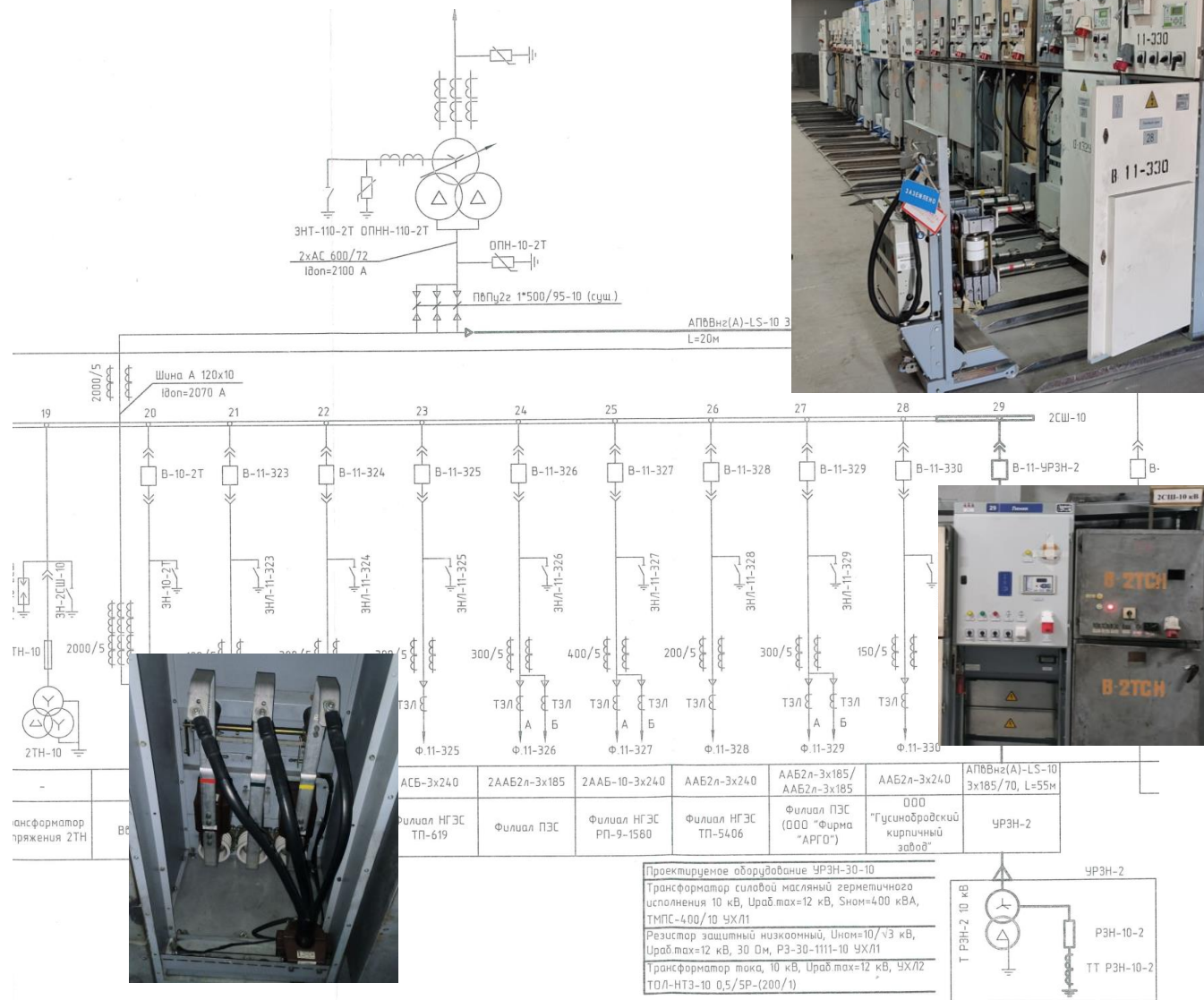


Сигнал с ТТ резистора следует заводить непосредственно в терминал МП РЗА для работы ненаправленной токовой защиты на этом присоединении.

Данный ТТ выполняет две функции:

- 1) защита резистора от длительного протекания тока при несрабатывании защит отходящих присоединений;
 - 2) защита от ОЗЗ на КЛ до нейтралеобразующего трансформатора / фильтра ФМЗ0.
- ❑ При ОЗЗ на этой КЛ через установленный в ячейке ТТНП не будет протекать ток резистора, который направлен к месту замыкания (в отличие от случая внешнего ОЗЗ, когда через ТТНП поврежденного присоединения будет протекать ток резистора, обеспечивая корректное срабатывание защиты от ОЗЗ поврежденного присоединения).
 - ❑ При ОЗЗ на кабеле к ТНЗ/ФНП/РЗ не должно происходить ложного срабатывания защит других отходящих присоединений. Зато через ТТ резистора в режиме ОЗЗ будет протекать его номинальный ток, обеспечивая срабатывание защиты присоединения с резистором с заданной $t_{откл}$ (рекомендуется уставка 3...5 с).

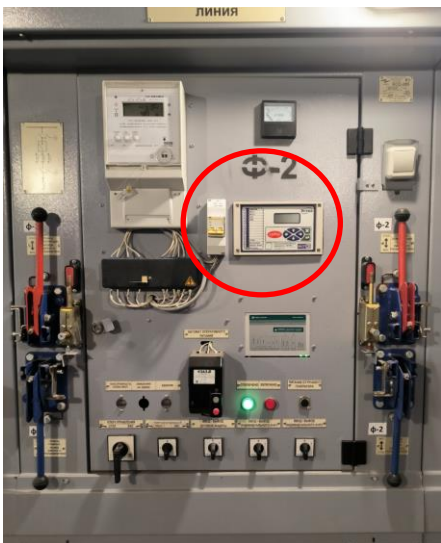
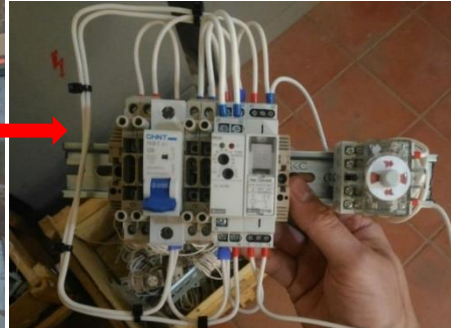
Ячейка	Наименование потребителя	I _c , А	Тип реле	I _{с.з.} , А	I _R	K _ч	t _{сз} , с
1СШ							
яч. 1		22,30	БЗП-02	80,0	183,5	2,29	0,8
яч. 3		3,60	БЗП-02	80,0	183,5	2,29	0,5
яч. 5		17,21	БЗП-02	80,0	183,5	2,29	0,8
яч.7		0,58	БЗП-02	80,0	183,5	2,29	0,5
яч.9		10,24	БЗП-02	80,0	183,5	2,29	0,5
яч.11	УРЗН-1	0,26	МКЗП-М2	80,0	183,5	2,29	5,0
2СШ							
яч. 2		2,04	БЗП-02	80,0	183,5	2,29	0,5
яч. 4		0,93	БЗП-02	80,0	183,5	2,29	0,8
яч. 6		5,99	БЗП-02	80,0	183,5	2,29	0,5
яч. 8		11,29	БЗП-02	80,0	183,5	2,29	0,8
яч. 10		18,77	БЗП-02	80,0	183,5	2,29	0,8
яч.12	УРЗН-2	0,13	МКЗП-М2	80,0	183,5	2,29	5,0



Особенности выбора уставок 3033 для отходящих линий

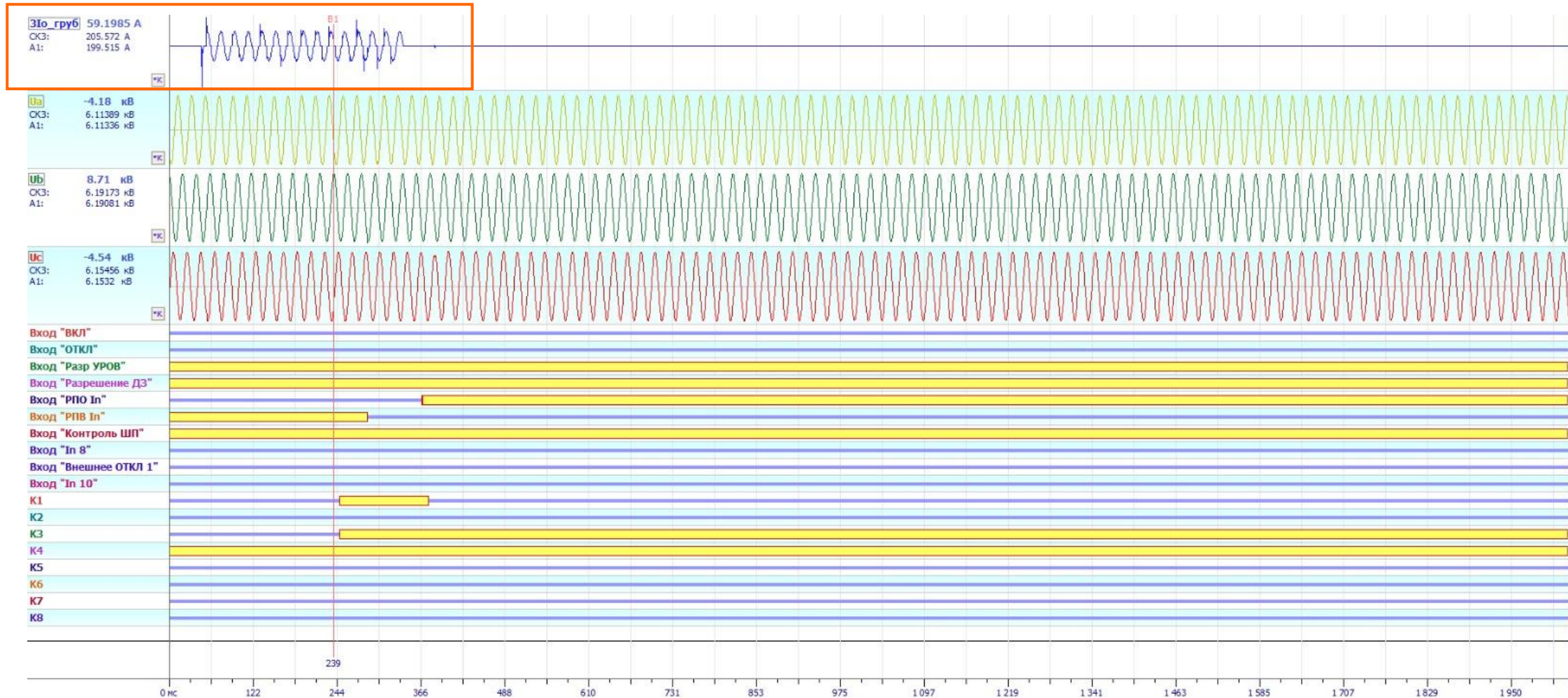
ПРИМЕР 2

РП 10 кВ прилегающей сети



Ячейка	Наименование потребителя	I_{Σ}, A	Тип реле	$I_{с.з.}, A$	I_R	K_u	$t_{сз}, c$
РП-1							
яч. 3		8,24	МКЗП-М2	60,0	183,5	3,1	0,5
яч. 11		0,95	МКЗП-М2	60,0	183,5	3,1	0,5
...		...	...	...	...	...	...
РП-2							
яч. 7		1,56	МіСОМ Р121	60,0	183,5	3,1	0,5
яч. 9		6,56	МіСОМ Р121	60,0	183,5	3,1	0,5
...		...	...	...	...	...	...
РП-3							
яч. 9		1,72	БЗП-02	60,0	183,5	3,1	0,5
яч. 10		1,66	БЗП-02	60,0	183,5	3,1	0,5
...		...	...	...	...	...	...
РП-4							
яч. 5		0,35	МКЗП-МИКРО 2.0	60,0	183,5	3,1	0,5
яч. 9		0,11	МКЗП-МИКРО 2.0	60,0	183,5	3,1	0,5
...		...	...	...	...	...	...

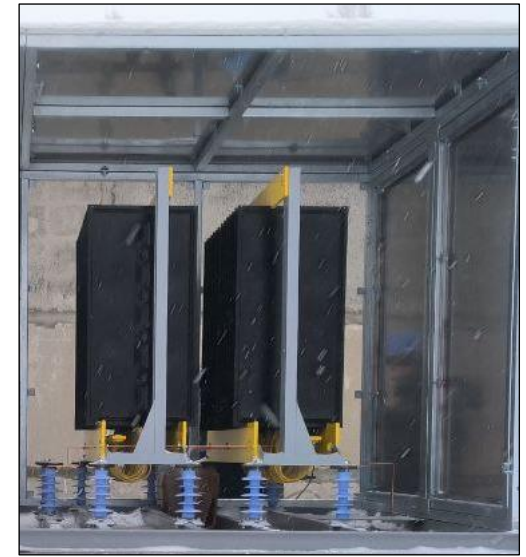
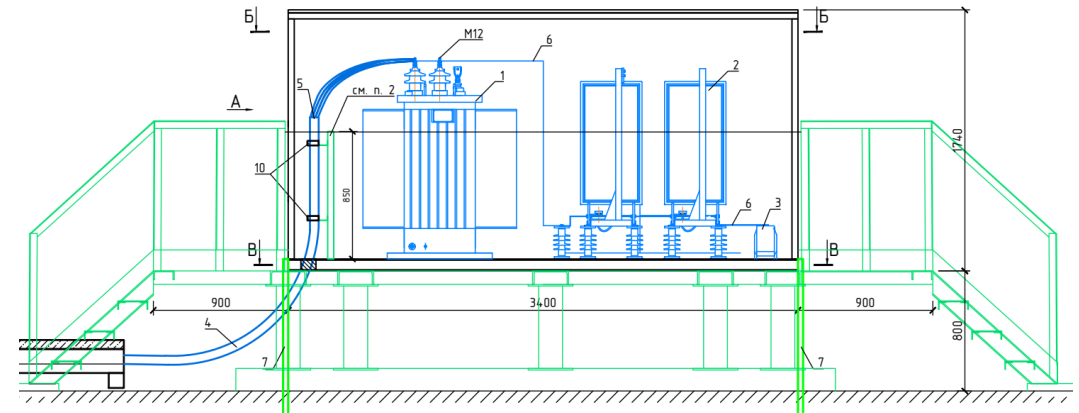
Осциллограмма с терминала фидера ПС, отключение «земли», $t=0,3$ с, $I_o = 205$ А



Монтаж УРЗН-30-10 УХЛ1 и новых шкафов КРУ, на ПС 110 кВ «Волочаевская»,
настройка РЗА выполнена с «заглубленными» уставками ($I_{сз} = 80 \text{ A}$)



Особенностью сети является наличие
нескольких участков ВЛ-10 кВ, АПВ при ОЗЗ
сохранили, успешно в 70% случаев

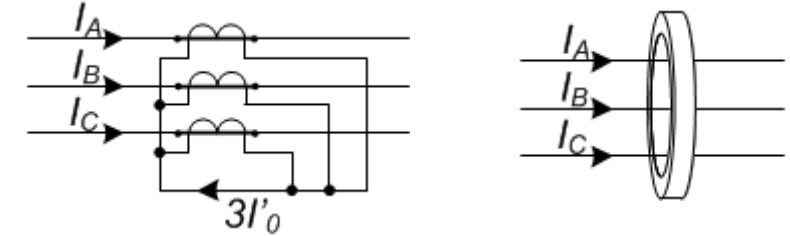


Заключение

- 1. Применение в защитах от ОЗЗ «хитрых» принципов** (сравнительного замера, наложения тока не промышленной частоты, на ВГ и пр.) обусловлено фактором неустойчивого горения дуги, а также малых значений тока замыкания 50 Гц при изолированной нейтрали и компенсации емкостного тока.
- 2. Методика расчета ненаправленной защиты** основана на проверке Кч при известных токах ОЗЗ, давно известна и изложена в классических работах М.А. Шабада, В.А. Андреева, А.И. Шалина. И так же давно известно, что усложнение принципов ЗОЗЗ связано в попытками создать «всережимную» защиту для любых сетей.
- 3. Простая токовая защита – оптимальный вариант для режима НРЗ**, технически обоснованный благодаря устойчивости ОЗЗ и достаточно большому току, протекающему через датчик тока НП (согласно IEEE Std.142-2007 токи от низкоомных резисторов составляют 100....1000 А).
- 4. Особенности реализации простой токовой защиты при низкоомном заземлении нейтрали**
 - а) возможность обеспечения заданных Кч и удобной настройки УРЗА (снижение рисков ошибочной наладки),*
 - б) применение кабельных трансформаторов тока без каких-то особых требований, включая разъемные «бублики» (разве что требуется нормальное качество монтажа двух частей разъемного ТТНП)*
 - в) хорошая вариативность в зависимости от бюджета (эл.мех.реле, эл.реле, МП терминалы).*

Выбор датчиков тока НП - кабельные трансформаторы тока или фильтры на базе фазных ТТ?

- Почему следует применять ТТНП, а не трехфазные фильтры на основе фазных ТТ? Из-за небалансов.
- Из-за нового режима нейтрали придется доустанавливать третий ТТ? Нет, не придется.



- При использовании в качестве датчиков тока $3I'_0$ ТТНП, ток небаланса определяется по формуле:

$$I_{\text{НБ}} = I_{\text{НБ300}} \frac{I_{\text{нагр}}}{300},$$

где $I_{\text{НБ300}}$ – ток небаланса ТТНП при протекании по кабелю тока в 300 А (его значение может быть взято из [Сирота И.М.]); $I_{\text{нагр}}$ – ток нагрузки в амперах. Для каб.сетей $I_{\text{НБ}}$ - доли ампер и им, как правило, пренебрегают.

- При использовании фильтров на базе фазных ТТ, в зависимости от выдержек времени, отстраиваются либо от небаланса при $I_{\text{кз}} (t_{\text{озз}} < t_{\text{кз}})$, либо от небаланса нагрузки (если $t_{\text{озз}} > t_{\text{кз}})$ [Руководящие указания по релейной защите]

$$I'_{\text{НБ}} = k'_{\text{одн}} \varepsilon I_{\text{НАГРmax}}, \quad (6)$$

где $k'_{\text{одн}}$ принимается равным 0,5...1,0;

$I_{\text{НАГРmax}}$ – максимальный ток нагрузки, который оценочно можно принять равным номинальному первичному току установленных на защищаемом фидере ТТ $I_{1\text{номТТ}}$.

При $I_{1\text{номТТ}} = (200-1500)$ А значение тока небаланса в соответствии с (5) $I'_{\text{НБ}} = (10-150)$ А, ток срабатывания защиты согласно (3)

Руководящие указания по релейной защите. Выпуск 12. Токовая защита нулевой последовательности от замыканий на землю линий 110-500 кВ. Расчёты. – М.: Энергия, 1980. – 87 с.

Сирота И.М. Трансформаторы и фильтры напряжения и тока нулевой последовательности. – Киев: Наукова Думка, 1983. – 267 с.