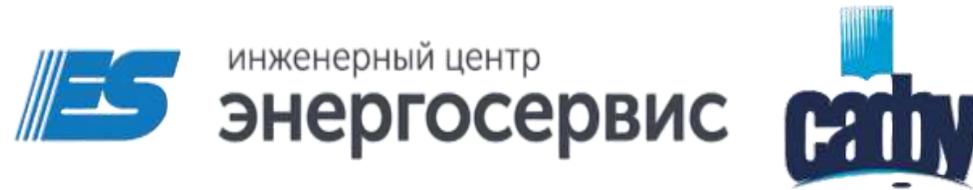
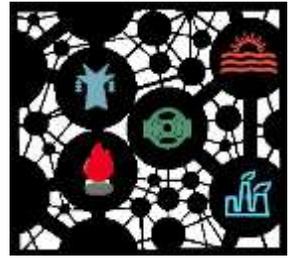


МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНЫЙ СЕМИНАР ИМ. Ю.Н. РУДЕНКО

МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ БОЛЬШИХ СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИКИ

96-е заседание «Надежность систем энергетики: устойчивое развитие и функционирование»



СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Пискунов С.А., Мокеев А.В.

15-19 июля 2024 г., Архангельск



Объект исследования: распределительные сети (РС) 6-35 кВ.

Предмет исследования: система релейной защиты РС.

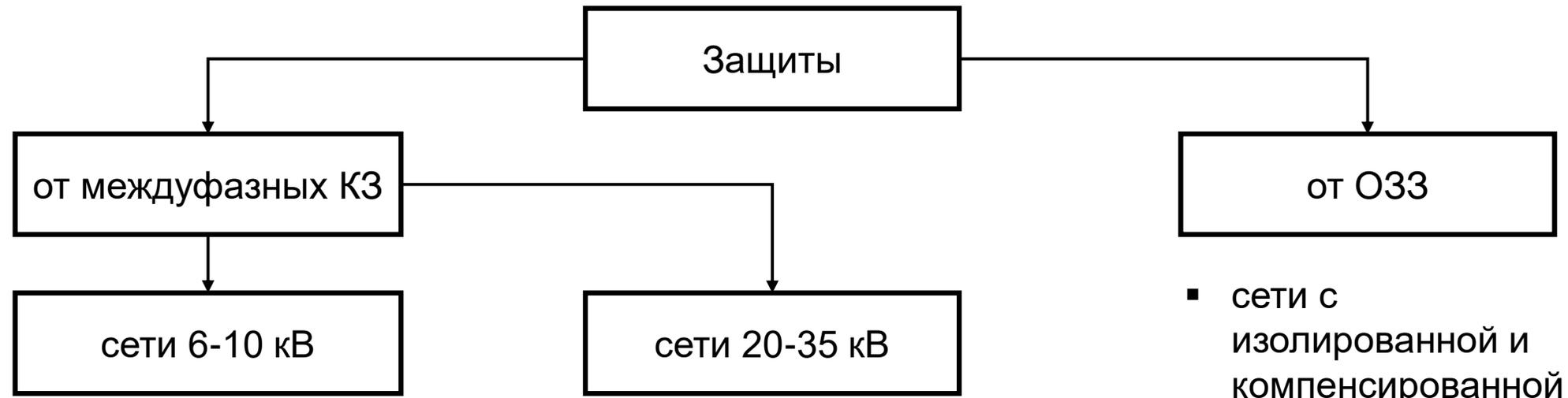
Постановка проблемы:

- широко распространенные токовые защиты от междуфазных КЗ во многих случаях не обеспечивают требуемой чувствительности и/или селективности действия;
- развитие сетей с распределенной генерацией (РГ) усложняет применение токовых защит;
- в сетях с компенсацией однофазного тока замыкания на землю (ОЗЗ) защиты на принципе измерения тока нулевой последовательности (НП) промышленной частоты неэффективны.

Цель исследования: совершенствование алгоритмов релейной защиты РС на основе применения технологии синхронизированных векторных измерений (СВИ).

Задачи:

- анализ характеристик применяемых токовых защит в сетях РС 6-35 кВ;
- совершенствование защит от междуфазных КЗ;
- совершенствование защиты от ОЗЗ;
- апробация разработанных алгоритмов.



- радиальные сети с односторонним питанием;
- токовые ступенчатые защиты;
- применение АВР, АПВ воздушных линий

- кольцевые сети;
- токовые ступенчатые направленные и дистанционные защиты

- сети с изолированной и компенсированной нейтралью;
- токовые защиты НП промышленной частоты, по направлению мощности НП

Место КЗ в сети	Параметр	Номинальное напряжение сети, кВ						
		городская сеть			промышленная сеть			
		6	10	110	6	10	35	110
начало	$I_{к.маx}^{(3)}$, кА	16,9	13,1	32,1	16,5	2,73	9,61	16,5
конец	$I_{к.маx}^{(3)}$, кА	1,97	0,98	1,2	10,5	1,06	4,95	-
начало	$I_{к.мин}^{(2)}$, кА	13,9	8,06	5,19	9,35	0,98	3,7	4,63
конец	$I_{к.мин}^{(2)}$, кА	1,7	0,82	0,24	6,06	0,63	2,13	-
-	$k_{маx}$	1,22	1,63	6,18	1,76	2,79	2,60	3,56
-	$k_{мин}$	1,16	1,20	5,00	1,73	1,68	2,32	-

$I_{к.маx}^{(3)}$ - ток трехфазного КЗ в максимальном режиме работы энергосистемы;

$I_{к.мин}^{(2)}$ - ток двухфазного КЗ в минимальном режиме работы энергосистемы.

$$k = \frac{I_{к.маx}^{(3)}}{I_{к.мин}^{(2)}}$$



I ступень. Токовая отсечка (ТО)

$I_{сз} = k_{отс} I_{к.вш.макс}^{(3)}$ - ток срабатывания защиты, $I_{к20\%}^{(2)} \geq I_{сз}$ - проверка чувствительности.

$$\frac{I_{к20\%min}^{(2)}}{I_{сз}} = \frac{\sqrt{3} |z_{сmax} + z_{л}|}{2k_{отс} |z_{сmin} + 0,2z_{л}|}, \quad \boxed{\frac{|z_{сmax} + z_{л}|}{|z_{сmin} + 0,2z_{л}|} \geq k_1, \quad k_1 = \frac{2k_{отс}}{\sqrt{3}}} \quad k_{отс} = 1,1 \div 1,2 \rightarrow k_1 = 1,27 \div 1,39$$

λ - относительная зона действия ТО.

$$\lambda(k_m, I_{кmax}^{(3)}, L) \leq \frac{(1 - k_m k_1) \frac{U_{ср}}{\sqrt{3} I_{кmax}^{(3)}} + L X_{уд}}{k_1 L X_{уд}}, \quad k_m = \frac{X_{сmin}}{X_{сmax}} = \frac{I_{кmax}^{(3)}}{I_{кmin}^{(3)}} \quad - \text{без учета активного сопротивления линии.}$$

$$\boxed{\lambda^2 + \lambda \frac{2k_m X_{сmax} X_{уд}}{L Z_{уд}^2} + \frac{(k_1^2 k_m^2 - 1) X_{сmax}^2 - 2L X_{уд} X_{сmax} - L^2 Z_{уд}^2}{k_1^2 L^2 Z_{уд}^2} = 0} \quad - \text{общее выражение.}$$



II ступень. Токовая отсечка с выдержкой времени (ТО ВВ)

$$I_{сз}^{III} = k_{отс}^{II} I_{сз.см}^{II} = k_{отс}^{II} k_{отс}^{I} I_{к\text{ вш.макс.см}}^{(3)} = k_{отс}^{II} I_{к\text{ вш.макс.см}}^{(3)} \quad \text{- ток срабатывания защиты,}$$

$$k_{отс}^{I} = 1,1 \div 1,2; k_{отс}^{II} = 1,1 \div 1,2 \rightarrow k_{отс} = 1,44 \quad \text{- максимальный коэффициент отстройки,}$$

$$k_{ч}^{II} = \frac{I_{кмин}^{(2)}}{I_{сз}} \geq 1,3 \div 1,5 \quad \text{- проверка чувствительности,}$$

$$\frac{I_{кмин}^{(2)}}{I_{сз}} = \frac{\frac{1}{2} \frac{U_{ср}}{|\underline{z}_{сmin} + \underline{z}_{л}|}}{k_{отс} \frac{U_{ср}}{\sqrt{3} |\underline{z}_{сmax} + \underline{z}_{л} + \underline{z}_{см.л}|}} = \frac{\sqrt{3} |\underline{z}_{сmax} + \underline{z}_{л} + \underline{z}_{см.л}|}{2k_{отс} |\underline{z}_{сmin} + \underline{z}_{л}|} \geq 1,5$$

$\frac{|\underline{z}_{сmax} + \underline{z}_{л} + \underline{z}_{см.л}|}{|\underline{z}_{сmin} + \underline{z}_{л}|} \geq k_2$

$$k_2 = \frac{1,5 \cdot 2 \cdot k_{отс}}{\sqrt{3}} \approx 2,494$$

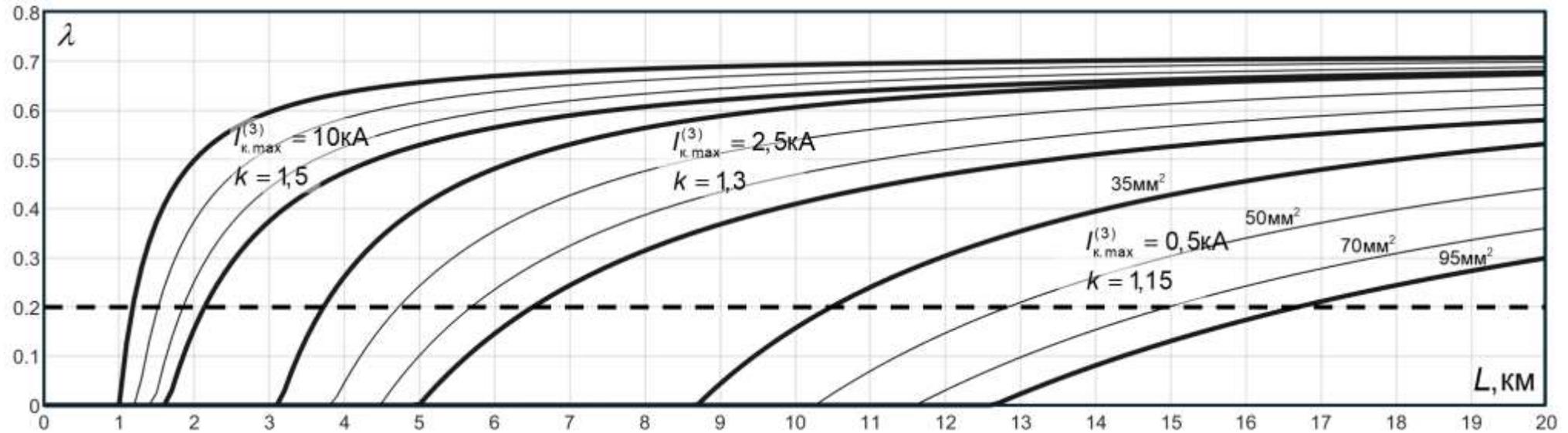
III ступень. Максимальная токовая защита (МТЗ)

$$I_{сз}^{III} = \frac{k_{отс}^{III} k_{сзп}}{k_{в}} I_{раб\text{ max}} = k_{отс} I_{раб\text{ max}} k_{отс} = \frac{k_{отс}^{III} k_{сзп}}{k_{в}}, k_{отс} = \frac{k_{отс}^{III} k_{сзп}}{k_{в}}, k_{отс}^{III} = 1,1 \div 1,2, k_{сзп} = 2,5 \div 3, k_{в} = 0,9 \div 0,95$$

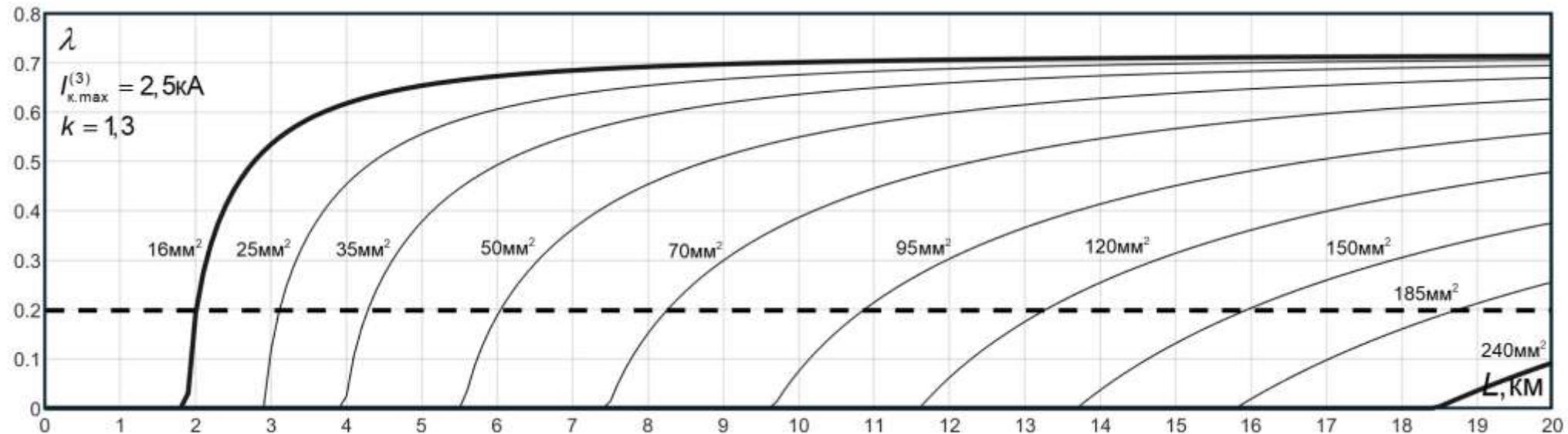
$$k_{ч} = \frac{I_{кмин.см}^{(2)}}{I_{сз}} \geq 1,2$$

$\frac{z_{нmax}}{|\underline{z}_{сmin} + \underline{z}_{л} + \underline{z}_{см.л}|} \geq k_3$

$$k_3 = \frac{1,2 \cdot 2 \cdot k_{отс}}{\sqrt{3}} \approx 5,543$$



Относительная зона действия ТО для воздушных линий 10 кВ



Относительная зона действия ТО для кабельных линий 10 кВ

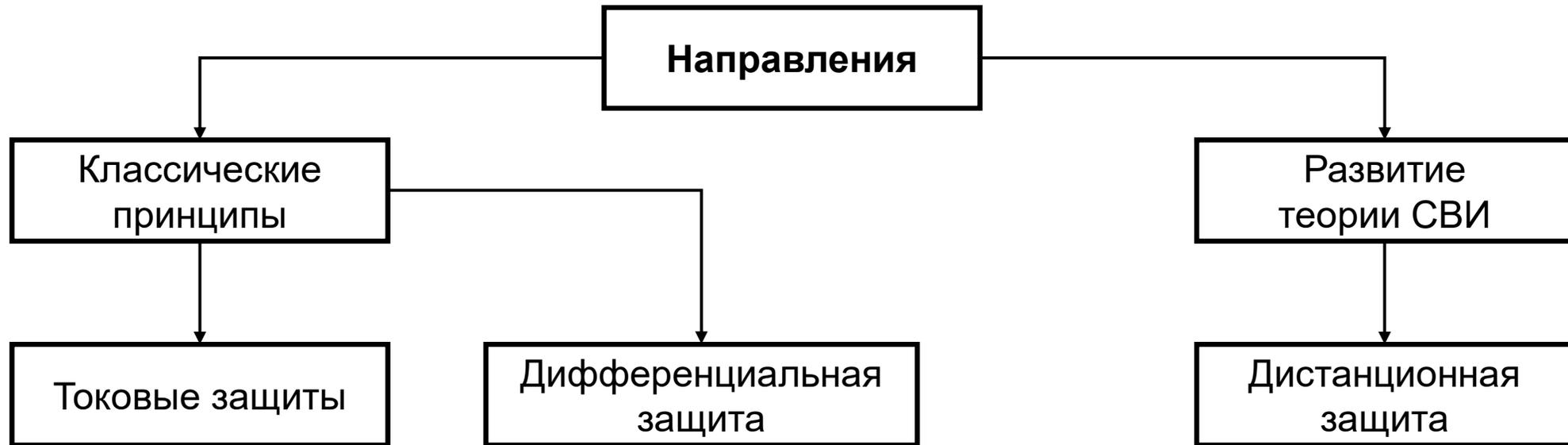


Выводы:

- зона действия токовых защит может варьироваться в очень широких пределах в зависимости от параметров энергосистемы, класса напряжения сети, типа и сечения линии;
- во многих практических случаях условия по чувствительности защит не выполняются;
- введение дополнительных ступеней защиты полностью не решает проблему снижения чувствительности, при этом защита имеет низкое быстродействие;
- токовые защиты малоэффективны в сетях с разветвленной структурой и большим числом отпаяк;
- усложняется применение токовых защит в сетях с РГ.

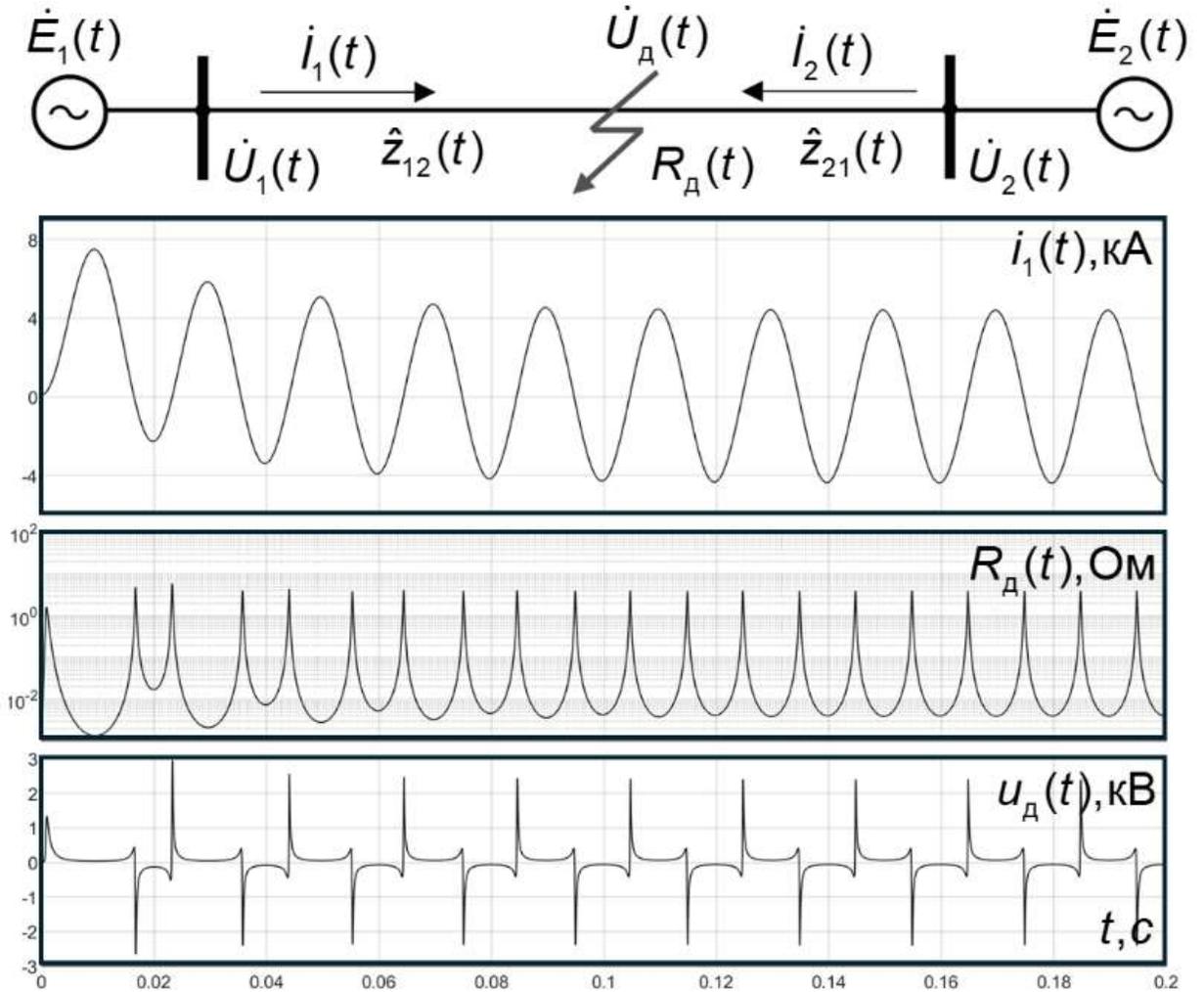
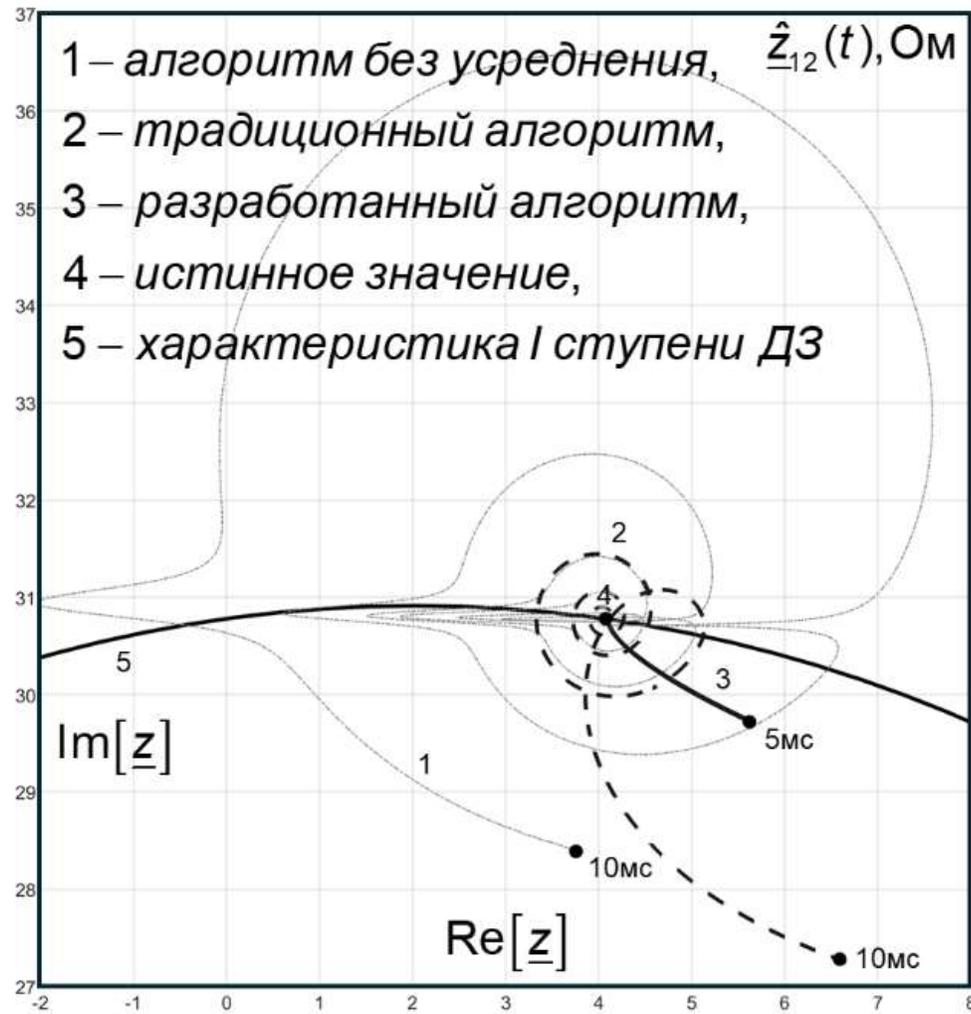
Преимущества СВИ:

- быстрая и точная оценка синхровекторов (модуля и фазы) тока и напряжения;
- оценка параметров элементов сети и параметров режима работы сети;
- использование набора параметров для распознавания повреждений;
- адаптивные принципы выполнения защиты.



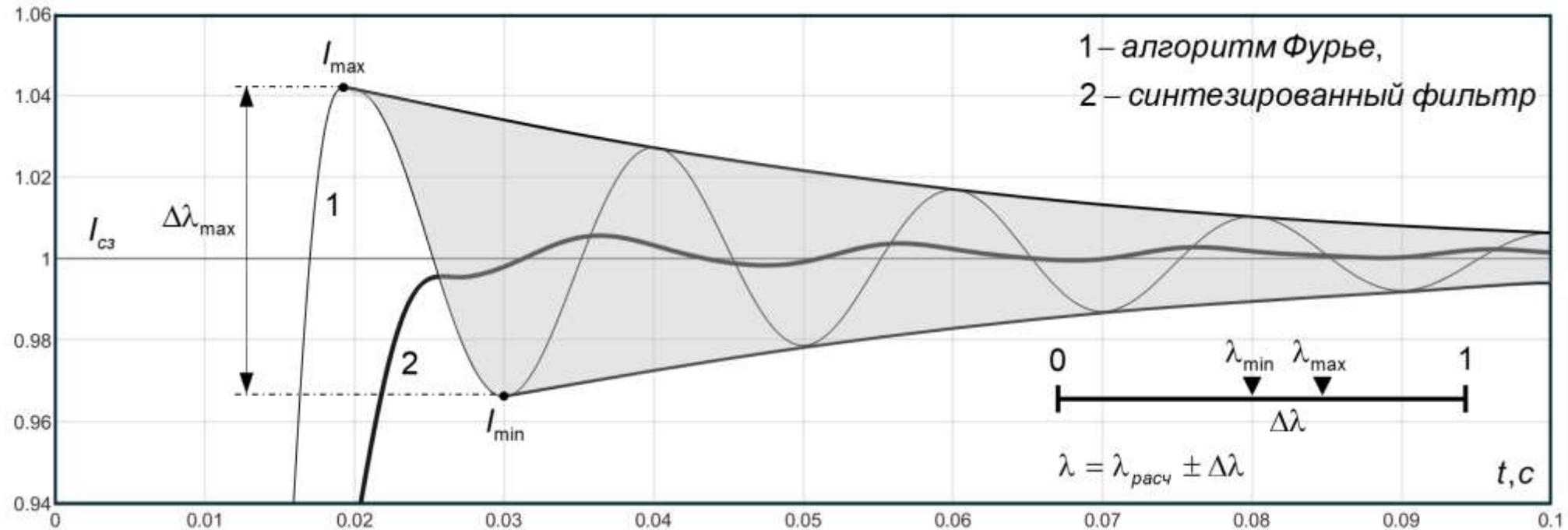


№ п/п	Наименование	Выражение
1	Общее выражение для одностороннего замера	$\underline{\hat{z}}(t) = \frac{\dot{U}(t)}{\dot{i}(t) + \underline{k}\dot{i}'(t)}, \dot{i}'(t) = \frac{di(t)}{dt}, \underline{k} = \frac{L_{уд}}{Z_{уд}}$
2	Компенсация сопротивления дуги	$\hat{R}_д(t) = \text{Re}(\underline{\hat{z}}(t)) - \text{Im}(\underline{\hat{z}}(t)) \frac{R_{уд}}{L_{уд}}, \underline{\hat{z}}_к(t) = \underline{\hat{z}}(t) - \hat{R}_д(t)$
3	Общее выражение для двухстороннего замера	$\underline{\hat{z}}_{12}(t) = \frac{\dot{U}_1(t) - \dot{U}_2(t) + \underline{z}\dot{i}_2(t) + L\dot{i}'_2(t)}{\dot{i}_1(t) + \dot{i}_2(t) + \underline{k}[\dot{i}'_1(t) + \dot{i}'_2(t)]}$
4	Оценка расстояния до точки КЗ	$\hat{l}_{12}(t) = \frac{\dot{U}_1(t) - \dot{U}_2(t) + \underline{z}\dot{i}_2(t) + L\dot{i}'_2(t)}{\underline{z}_{уд}[\dot{i}_1(t) + \dot{i}_2(t)] + L_{уд}[\dot{i}'_1(t) + \dot{i}'_2(t)]}$
5	Выражение для оценки сопротивления в нормальном режиме и при внешнем КЗ	$\underline{\hat{z}}(t) = \frac{\dot{U}_1(t) - \dot{U}_2(t)}{\dot{i}_1(t) + \underline{k}\dot{i}'_1(t)}$



Влияние методов обработки сигнала на защиту:

- ограничения применения «быстрых» алгоритмов (два или несколько отсчетов сигнала);
- преимущественное применение усредняющих фильтров;
- синтез специализированных фильтров для микропроцессорных устройств защиты.





Перспективные подходы:

1. Лачугин В.Ф., Иванов С.В., Белянин А.А. Разработка импульсных защит от замыканий на землю. – Релейная защита и автоматизация. – 2012. – №03(08). – С. 50-57.
2. Шуин В. А. и др. Адаптивные токовые защиты от замыканий на землю в кабельных сетях 6-10 кВ // Электрические станции. – 2018. – №. 7. – С. 38-45.

Преимущества СВИ:

- быстрая и точная оценка синхровекторов тока и напряжения НП;
- различные принципы выполнения защиты (локальный, централизованный, распределенный);
- оценка параметров проводимости присоединения;
- оценка эквивалентных синхровекторов высших гармоник (ЭСВГ).



$i_{0e}(t), \dot{U}_{0e}(t)$ - оценка ЭСВГ тока и напряжения НП.

$$i_{0e}(t) = \sum_{m=1}^M i_{0(2m+1)}(t), \quad \dot{U}_{0e}(t) = \sum_{m=1}^M \dot{U}_{0(2m+1)}(t), \quad \dot{U}_{0me}(t) = \sum_{m=1}^M (2m+1) \dot{U}_{0(2m+1)}(t)$$

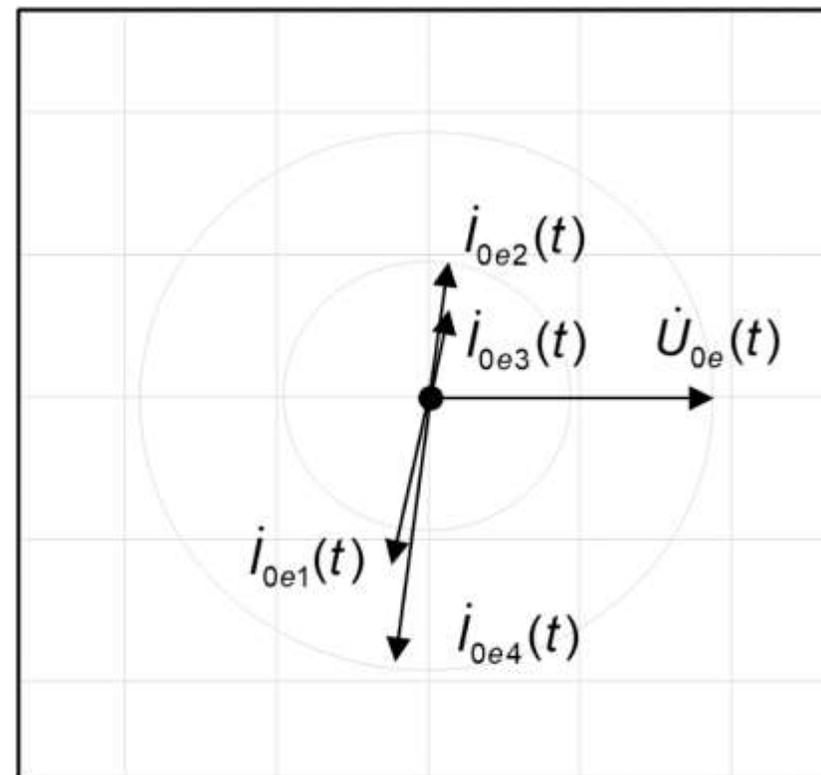
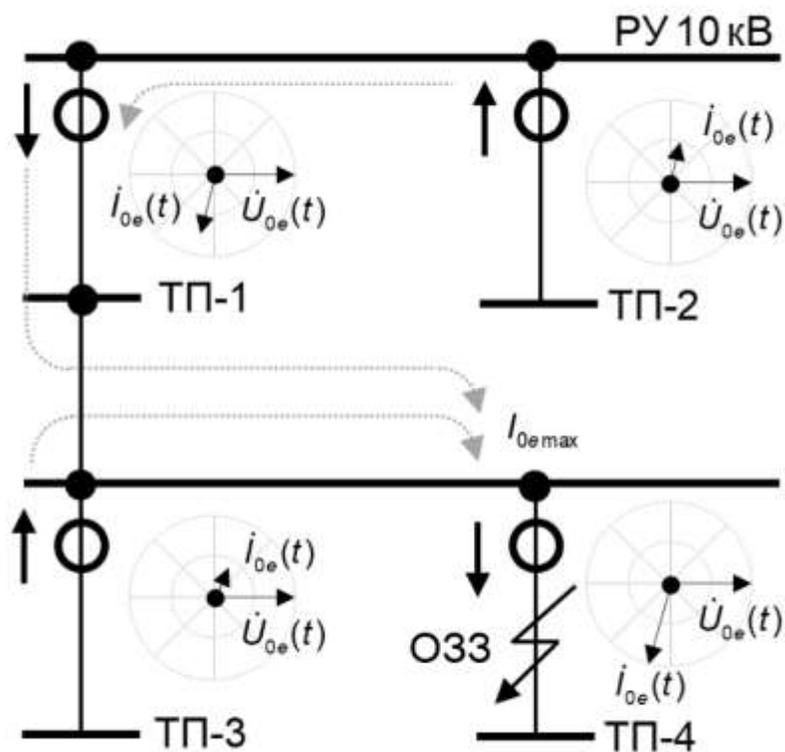
m - порядок гармонической составляющей.

$$\hat{C}_0(t) = \frac{i_{0e}(t)}{j\omega_0 \dot{U}_{0me}(t) + \dot{U}'_{0e}(t)} \quad - \text{оценка емкости присоединения.}$$

Преимущества:

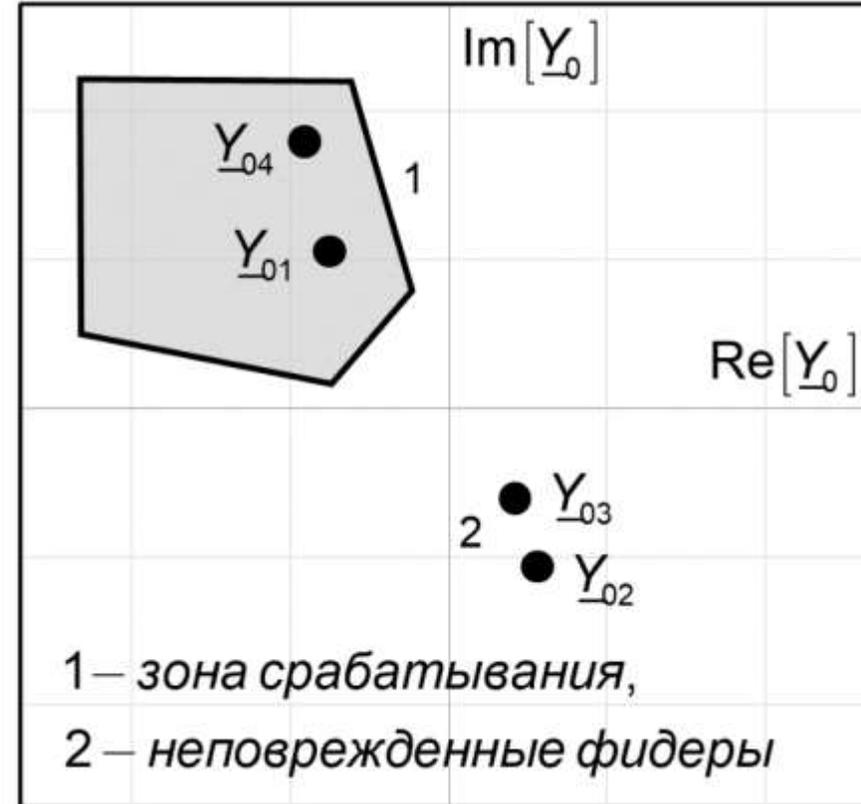
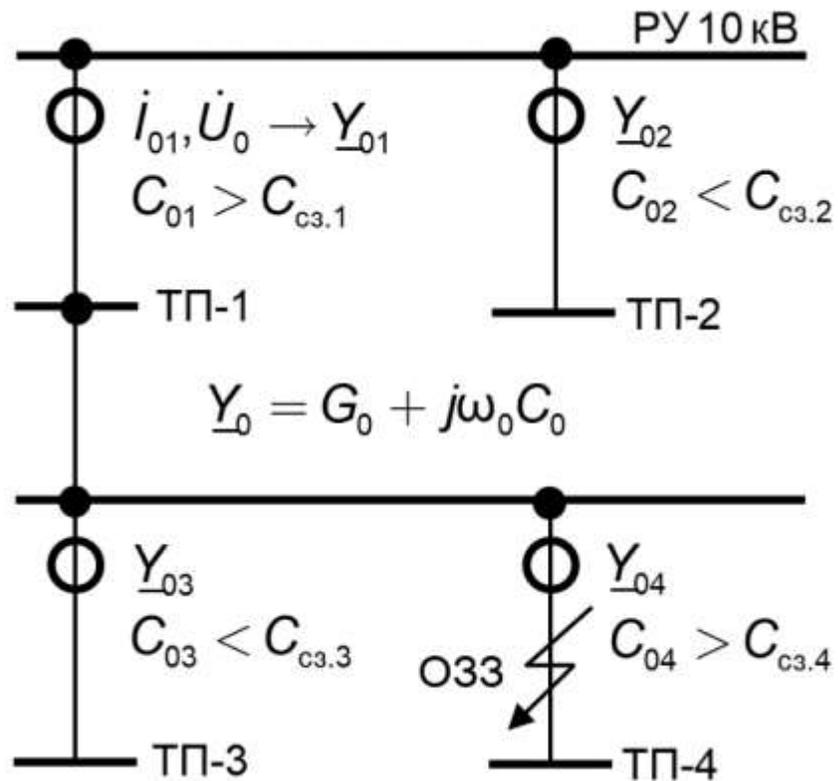
- независимость от состава гармоник в измеряемом сигнале;
- реализация различных принципов защиты от ОЗЗ;
- оценка емкости присоединения и задание характеристики срабатывания защиты.

Эквивалентные синхровекторы высших гармоник





Адмиттансный принцип выполнения защиты от ОЗЗ

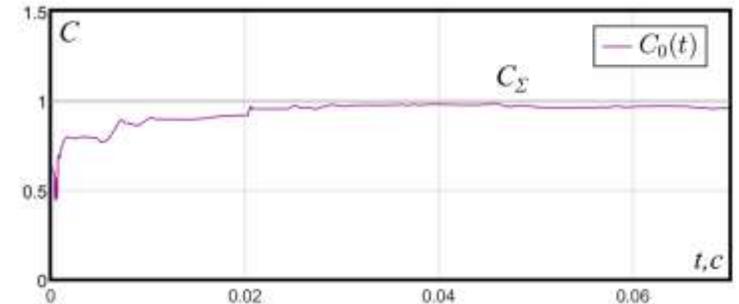
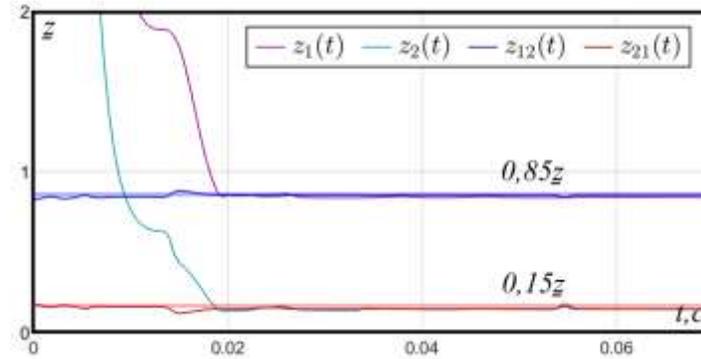
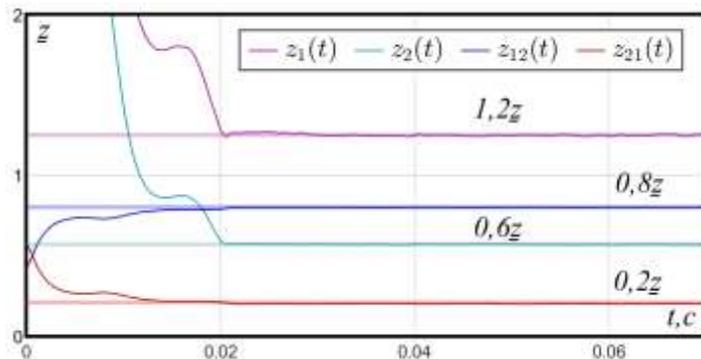
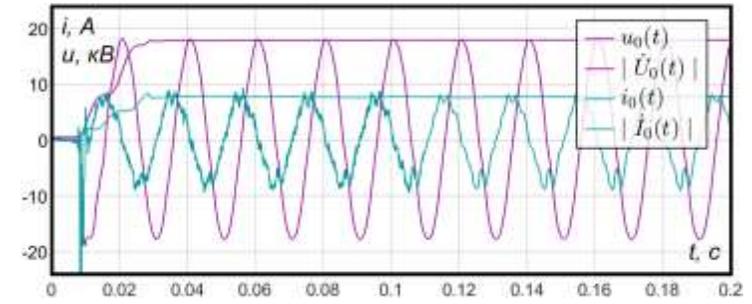
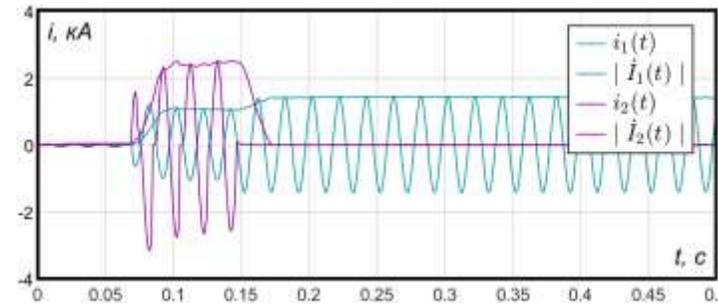
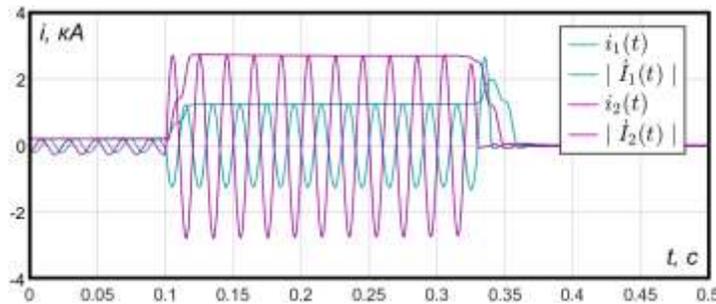
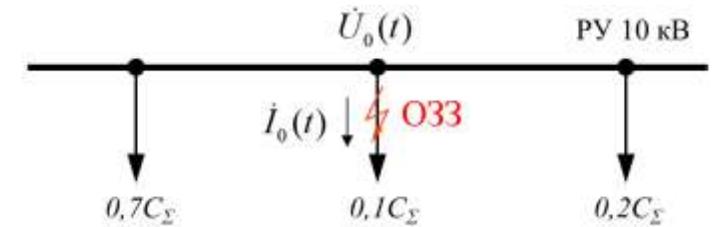
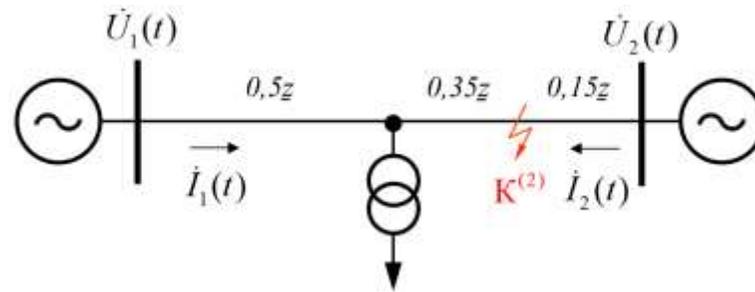
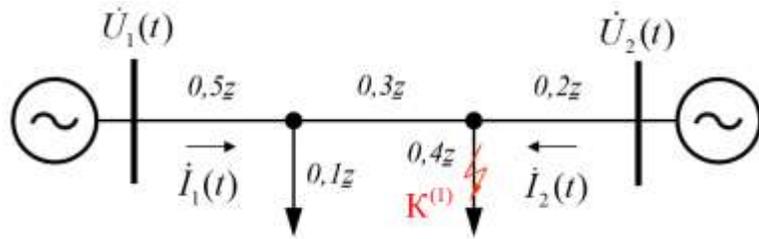


Анализ осциллограмм реальных аварийных процессов

Сеть 110 кВ, однофазное КЗ

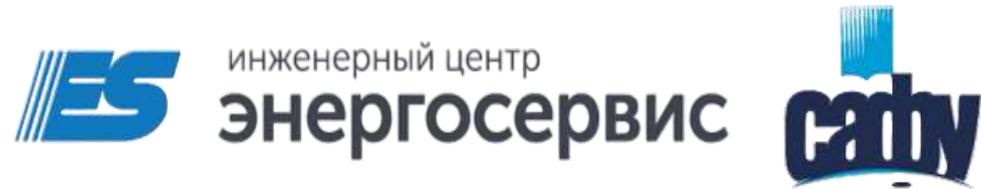
Сеть 110 кВ, двухфазное КЗ

Сеть 10 кВ, ОЗЗ





1. Анализ работы распределительных сетей 6-35 кВ показывает, что во многих случаях токовые принципы выполнения защиты не обеспечивают требуемый уровень чувствительности.
2. Развитие сетей с распределенной генерацией обуславливает необходимость в совершенствовании существующих и применении новых принципов защиты РС.
3. Применение технологии СВИ позволяет рассматривать новые подходы как к принципам построения токовых защит РС 6-35 кВ, так и к другим защитам.
4. Наибольшие преимущества СВИ могут быть получены при разработке алгоритмов дифференциальной и дистанционной защиты, защиты от ОЗЗ.
5. При разработке алгоритмов в современных микропроцессорных устройствах релейной защиты также особое внимание следует уделять цифровой обработке сигналов.



Благодарим за внимание!

Пискунов Сергей Александрович, s.piskunov@ens.ru