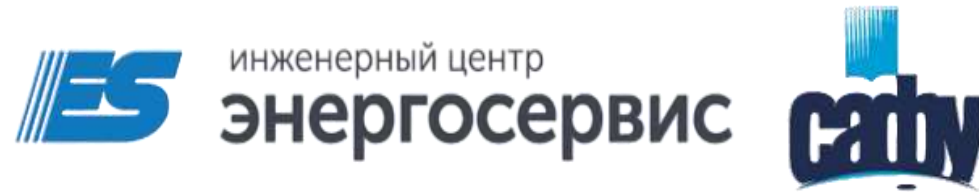


# МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНЫЙ СЕМИНАР ИМ. Ю.Н. РУДЕНКО

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.

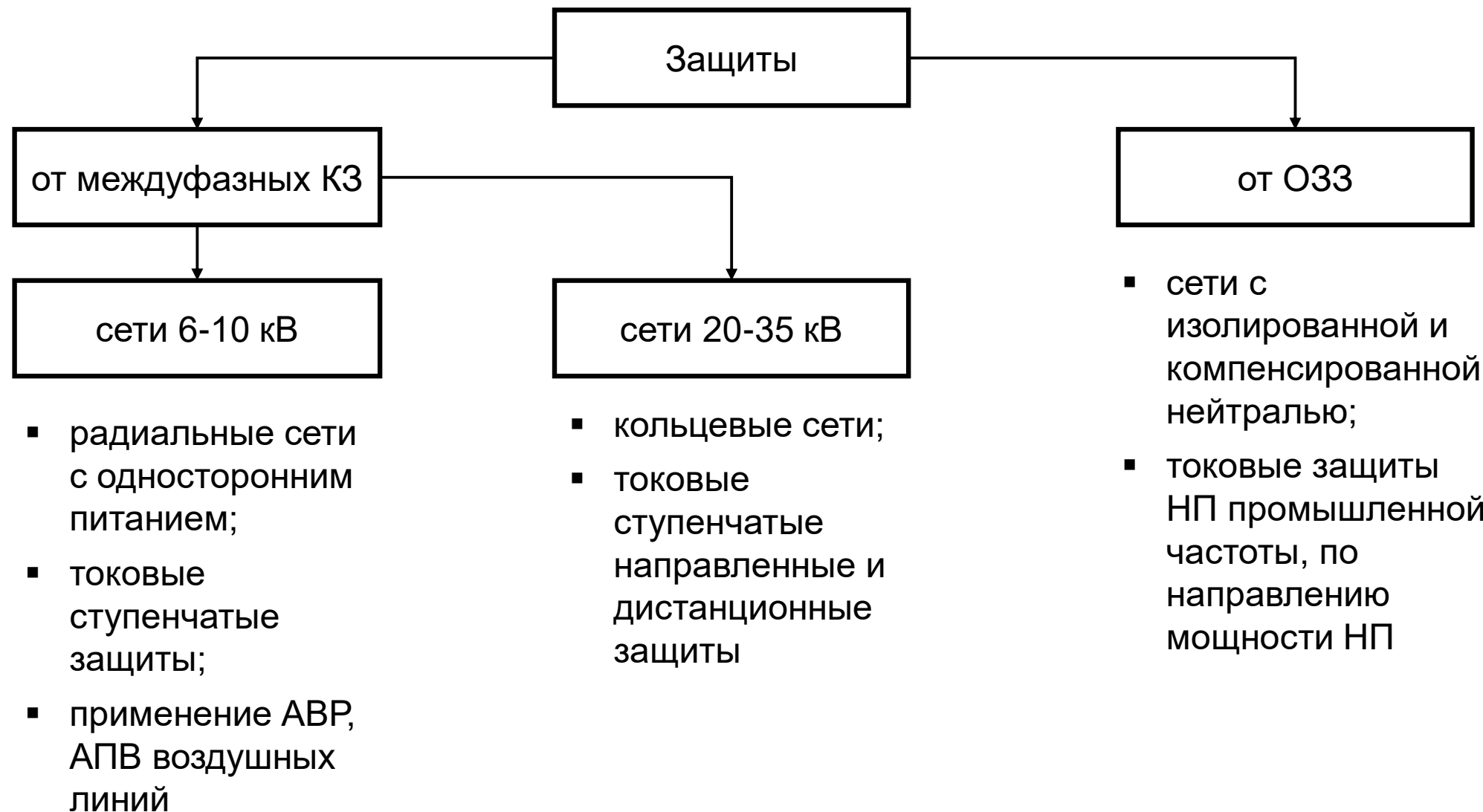
**Постановка проблемы:**

- 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.



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.

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

$\lambda$  - 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)

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

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

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

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

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

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

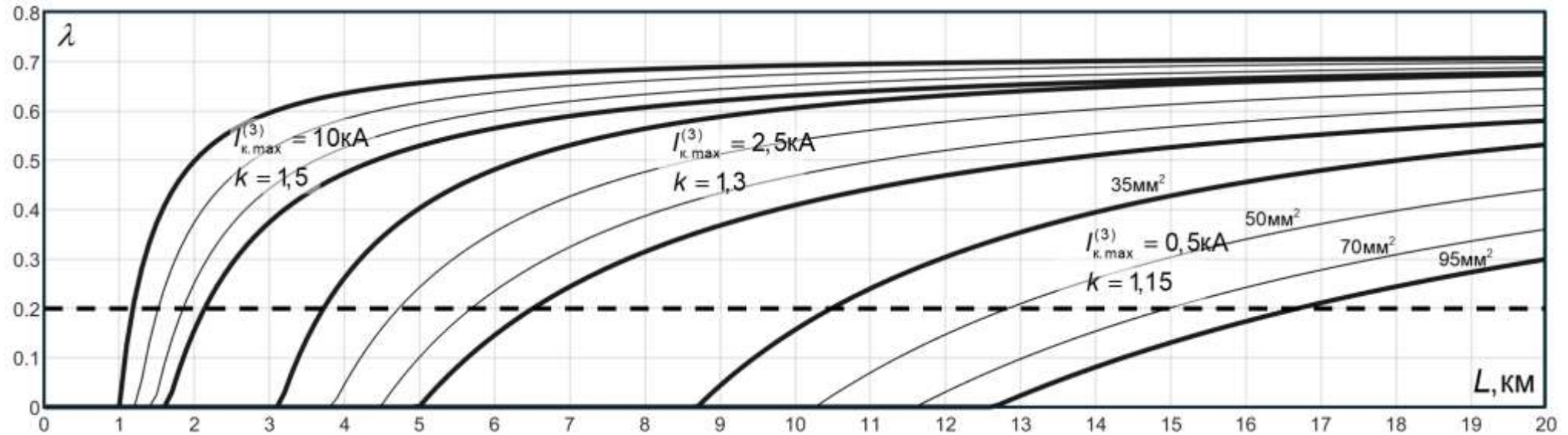
## III ступень. Максимальная токовая защита (МТЗ)

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

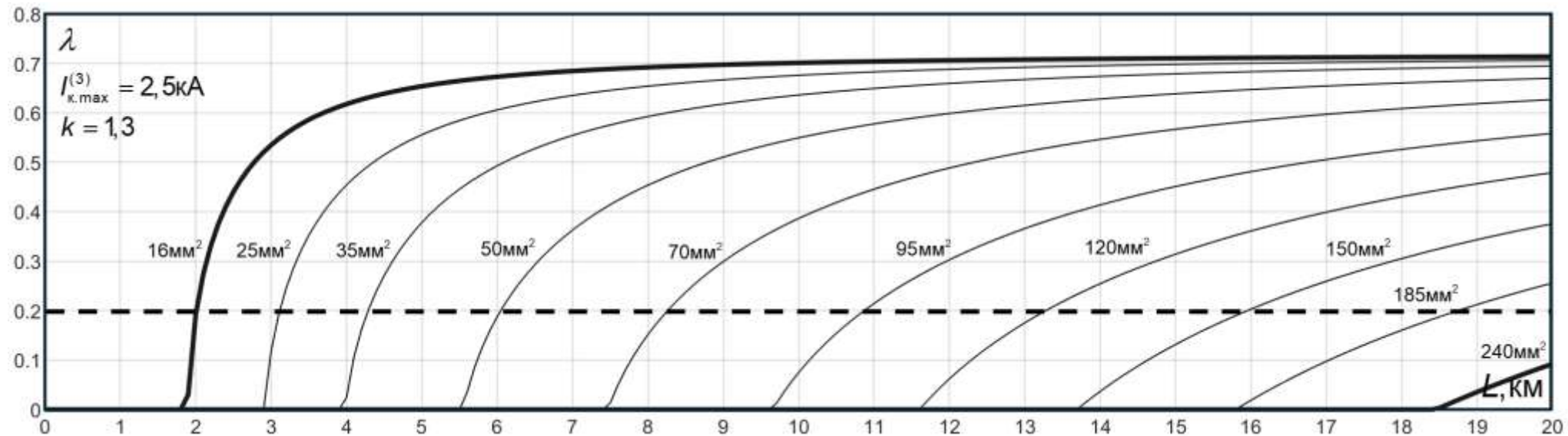
$$k_{ч} = \frac{I_{кмин.см}^{(2)}}{I_{сз}} \geq 1,2$$

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

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



Относительная зона действия ТО для воздушных линий 10 кВ



Относительная зона действия ТО для кабельных линий 10 кВ



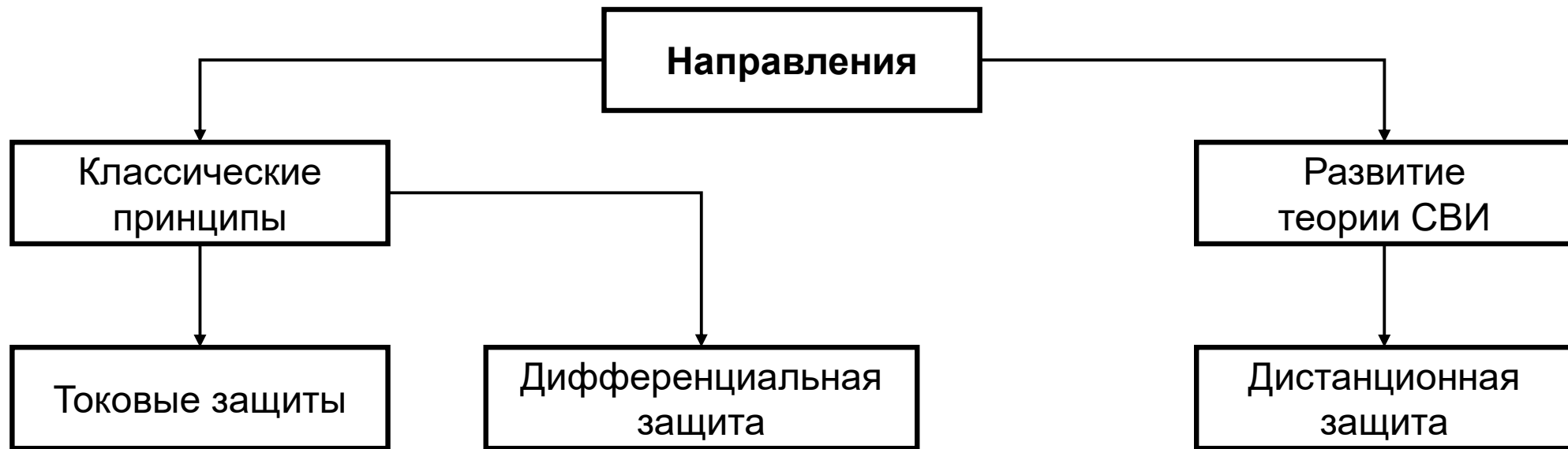
## Выводы:

- 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.



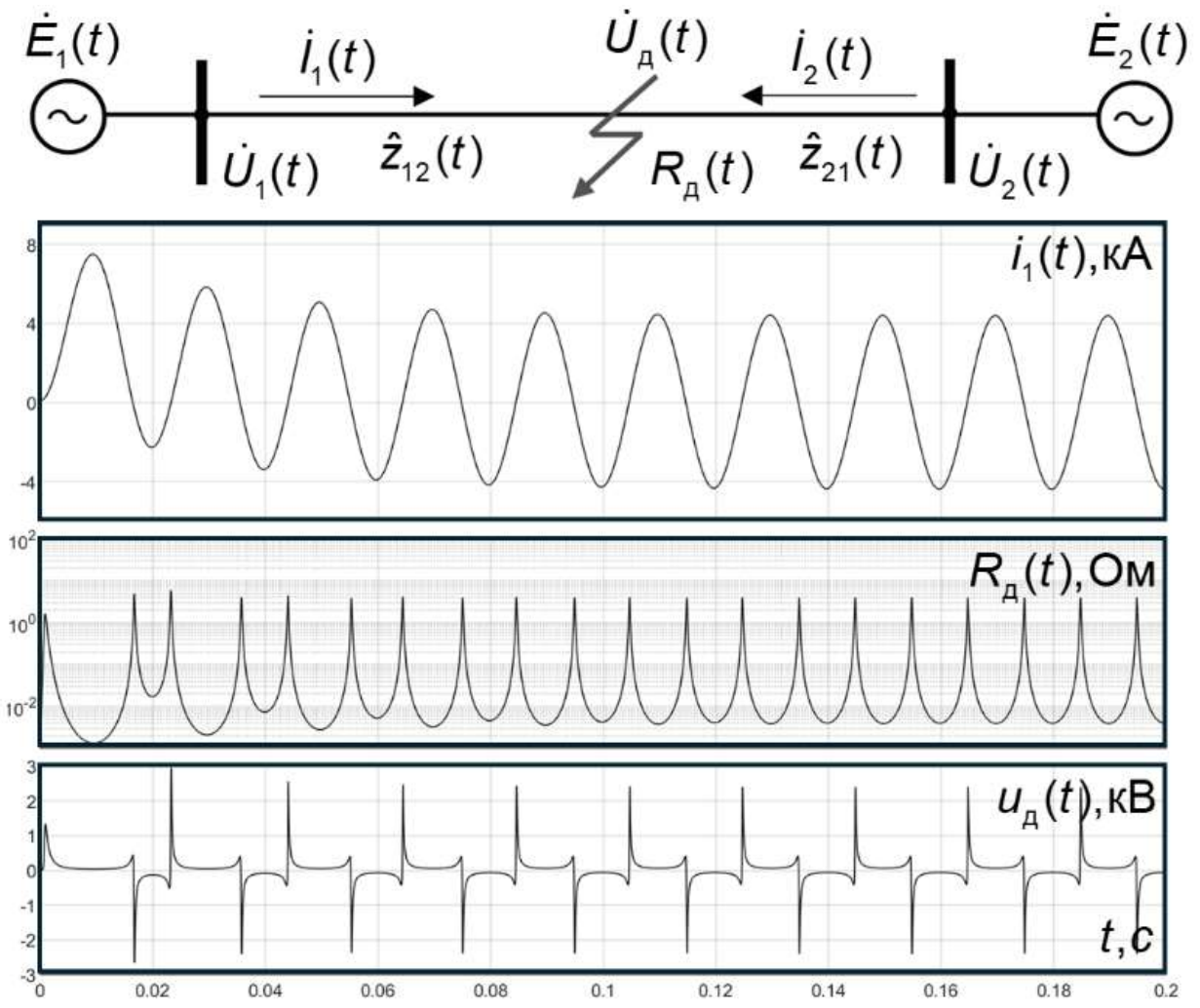
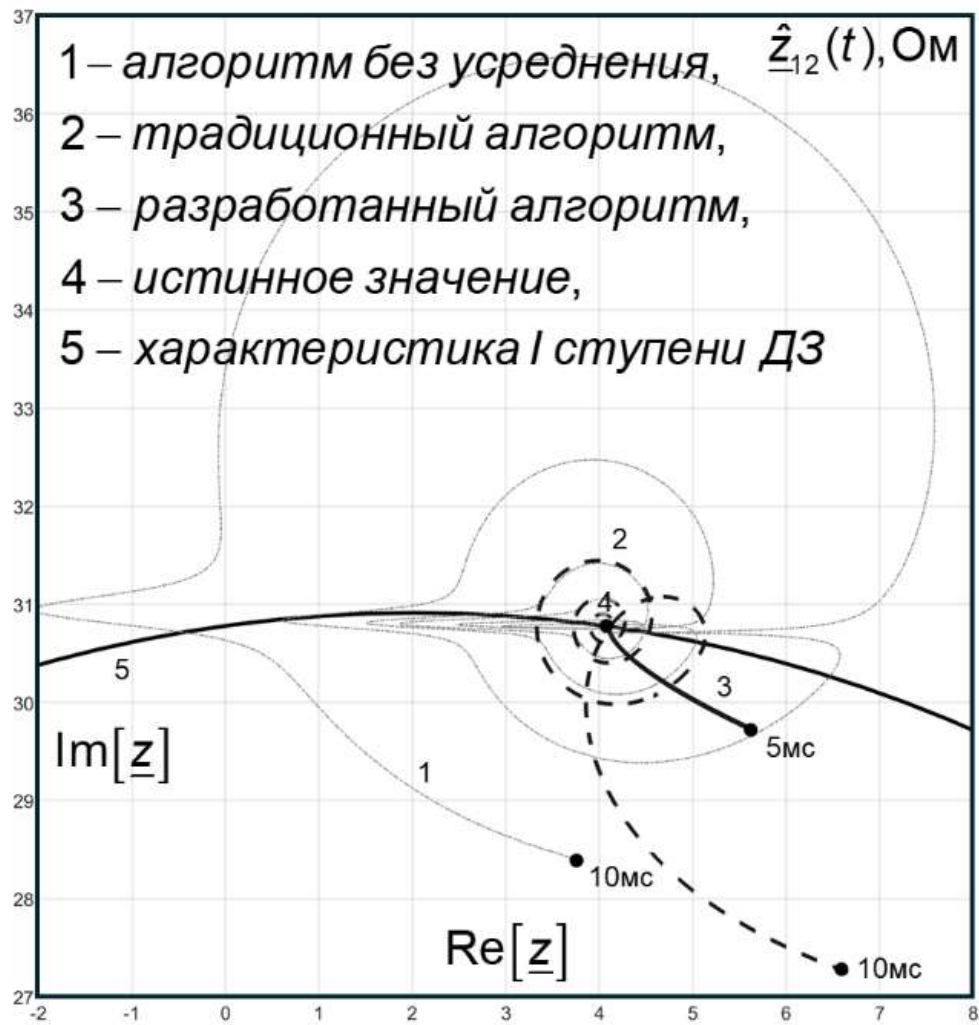
## Преимущества СВИ:

- 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.



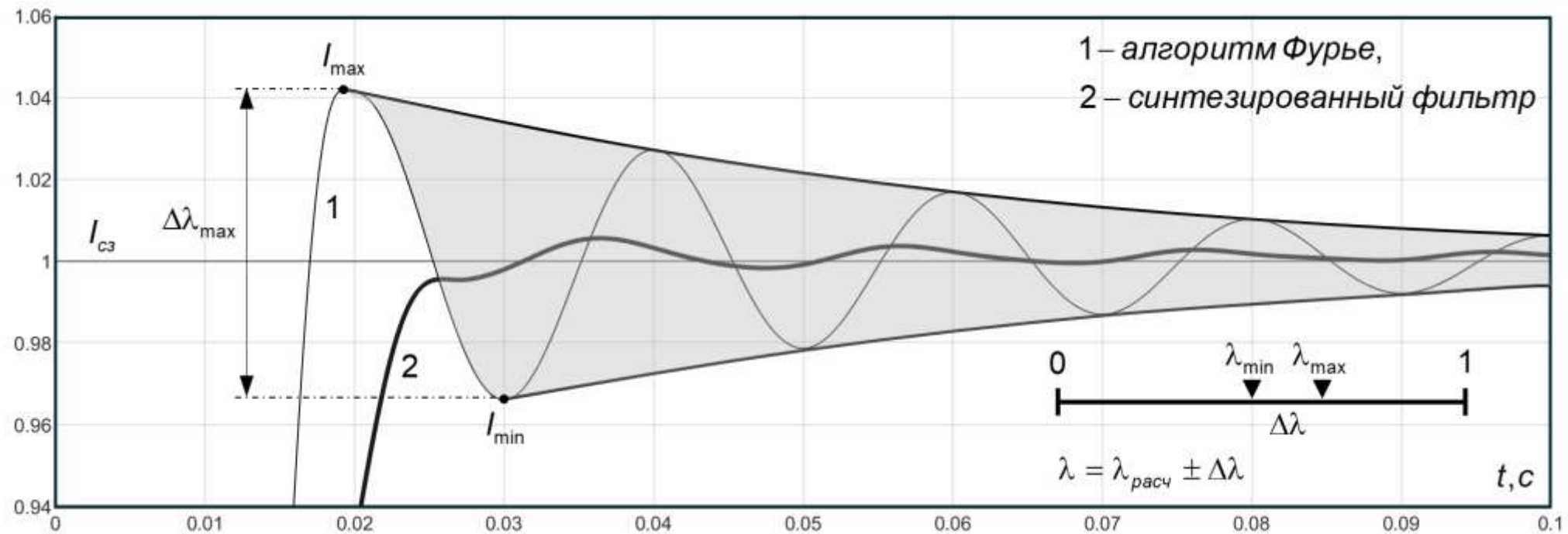


№ п/п	Наименование	Выражение
1	Общее выражение для одностороннего замера	$\underline{\hat{z}}(t) = \frac{\dot{U}(t)}{\dot{i}(t) + \underline{k}\dot{i}'(t)}, \dot{i}'(t) = \frac{di(t)}{dt}, \underline{k} = \frac{L_{уд}}{Z_{уд}}$
2	Компенсация сопротивления дуги	$\hat{R}_д(t) = \text{Re}(\underline{\hat{z}}(t)) - \text{Im}(\underline{\hat{z}}(t)) \frac{R_{уд}}{L_{уд}}, \underline{\hat{z}}_к(t) = \underline{\hat{z}}(t) - \hat{R}_д(t)$
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.

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

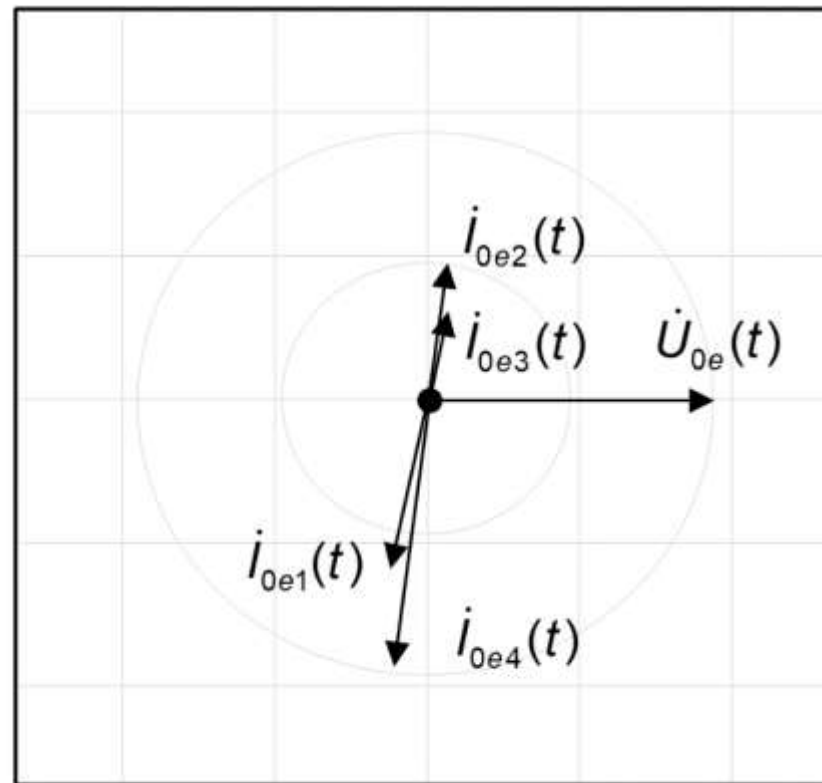
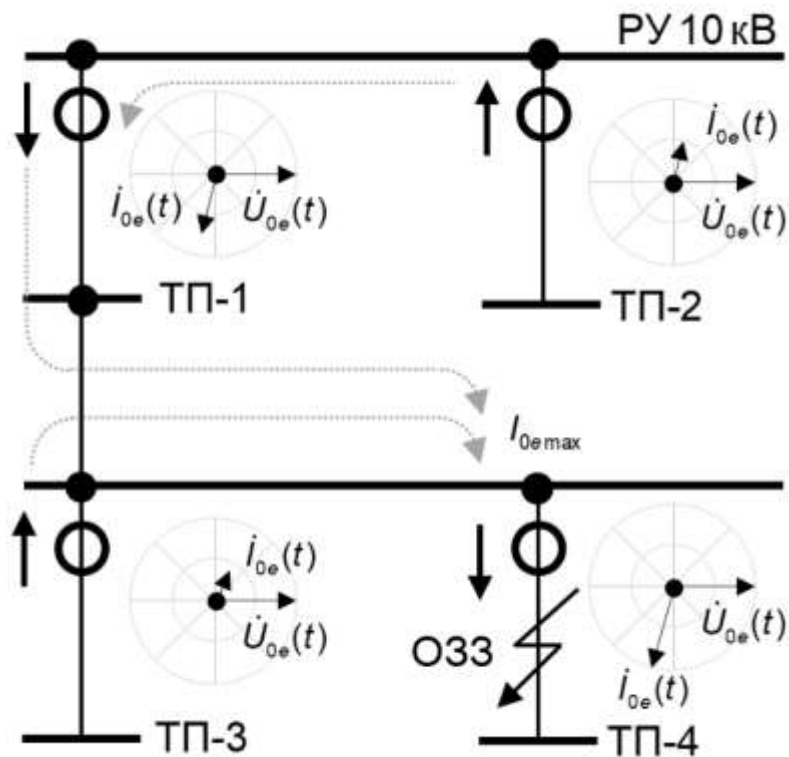
$m$  - порядок гармонической составляющей.

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

## Преимущества:

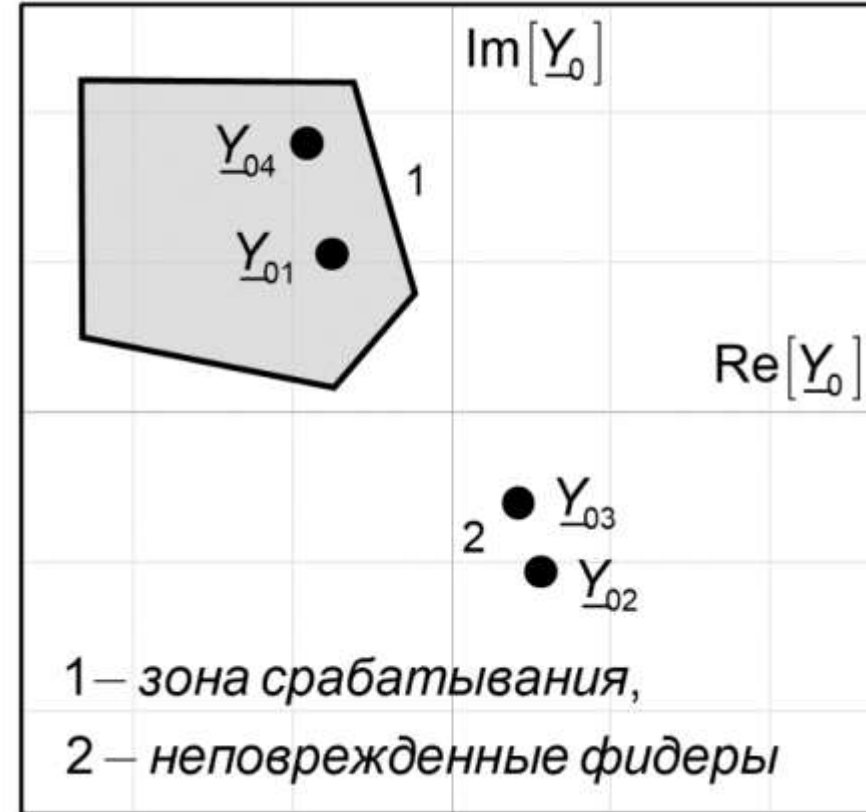
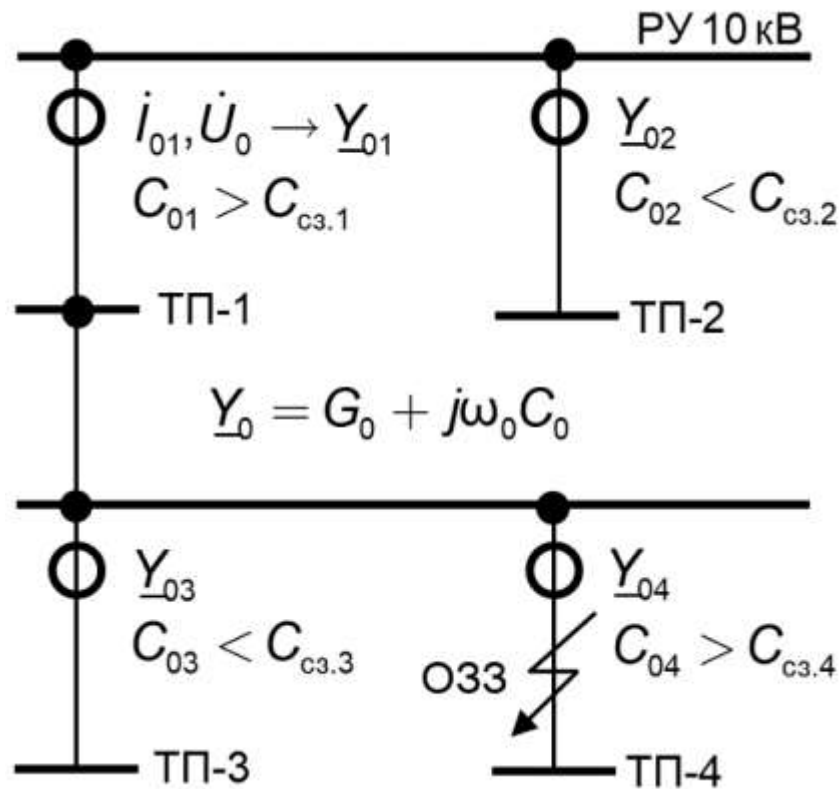
- независимость от состава гармоник в измеряемом сигнале;
- реализация различных принципов защиты от ОЗЗ;
- оценка емкости присоединения и задание характеристики срабатывания защиты.

## Эквивалентные синхровекторы высших гармоник





## Адмиттансный принцип выполнения защиты от ОЗЗ



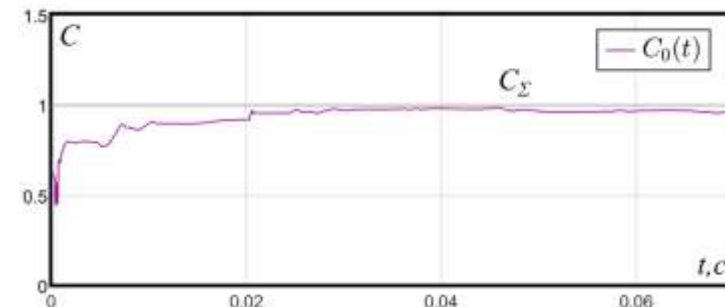
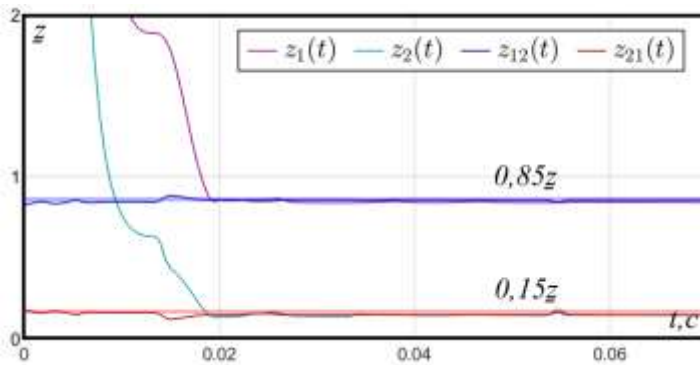
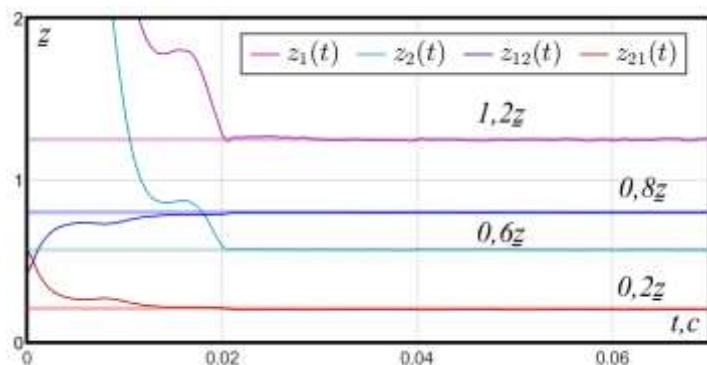
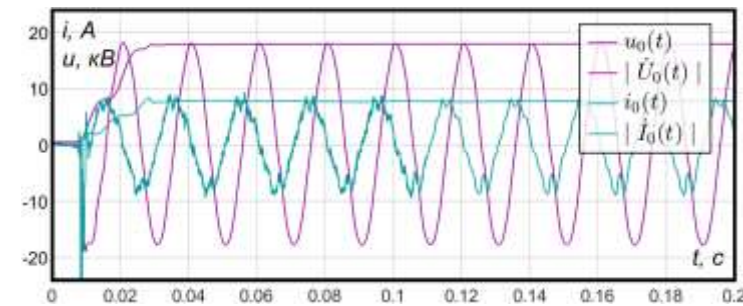
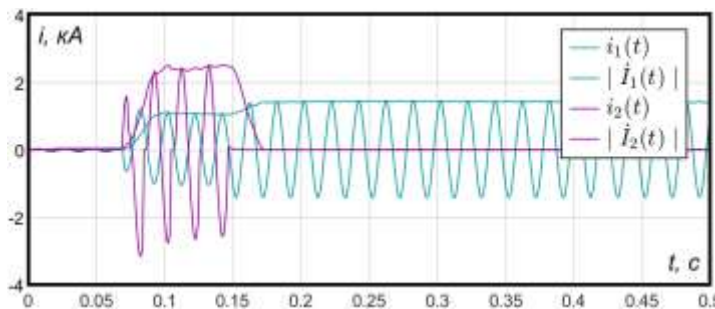
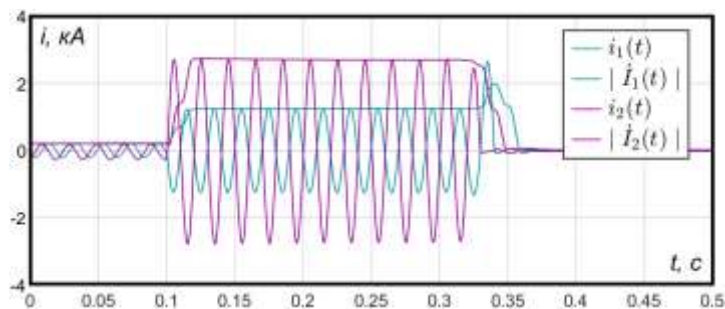
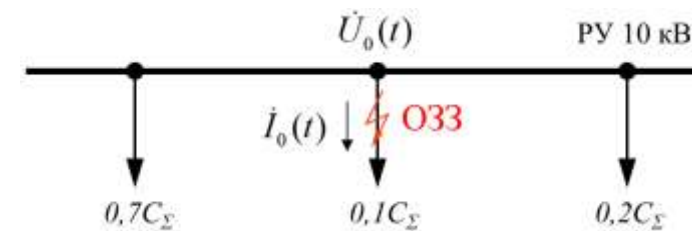
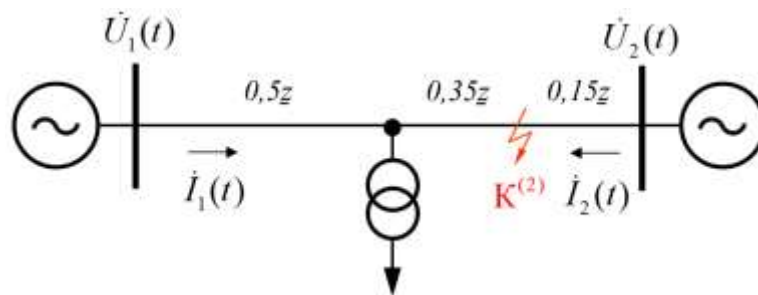
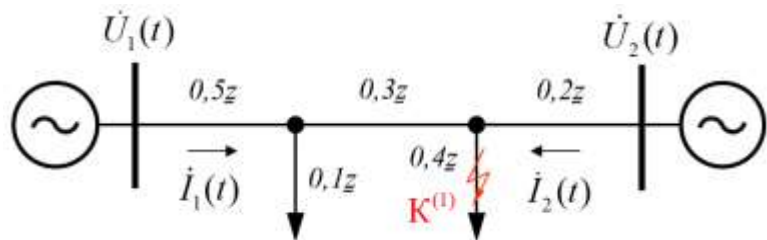


## Анализ осциллограмм реальных аварийных процессов

Сеть 110 кВ, однофазное КЗ

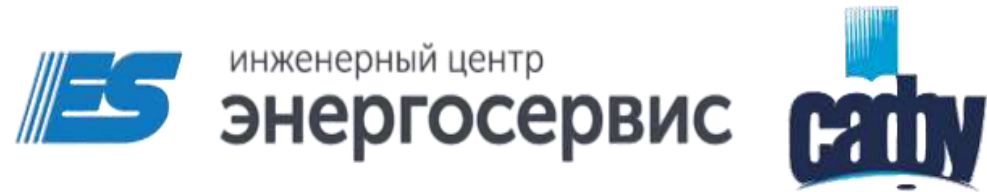
Сеть 110 кВ, двухфазное КЗ

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](mailto:s.piskunov@ens.ru)