Научно-практическая конференция
«Релейная защита и автоматизация энергосистем.
Совершенствование эксплуатации и перспективы развития»
Международный форум «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ 2026»

ens
инженерный центр
энергосервис

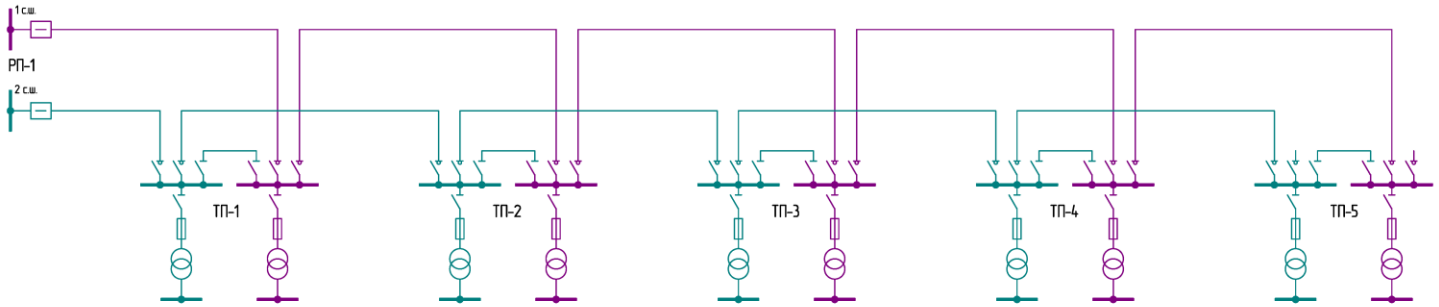
Совершенствование защиты линий среднего напряжения на основе цифровых измерительных трансформаторов со встроенными функциями РЗА

Ульянов Д.Н., Мокеев А.В., Пискунов С.А.

18 ноября 2026, г. Москва

Тенденции развития сетей среднего напряжения

классическая магистральная схема электроснабжения



кольцевая схема с двумя источниками питания

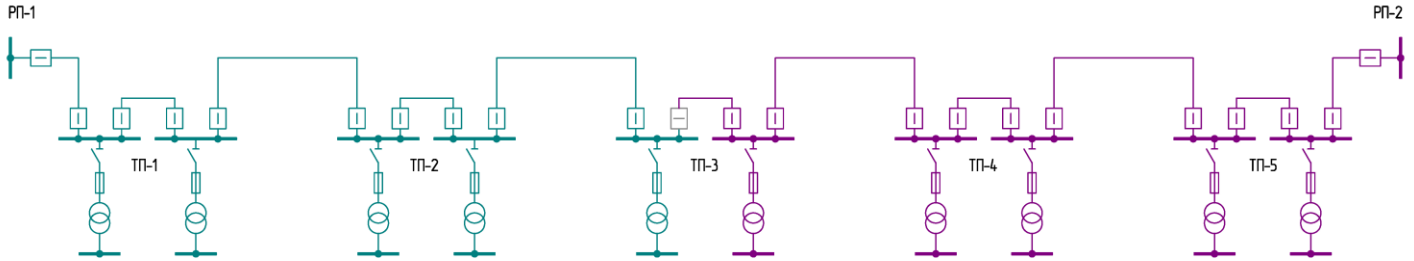
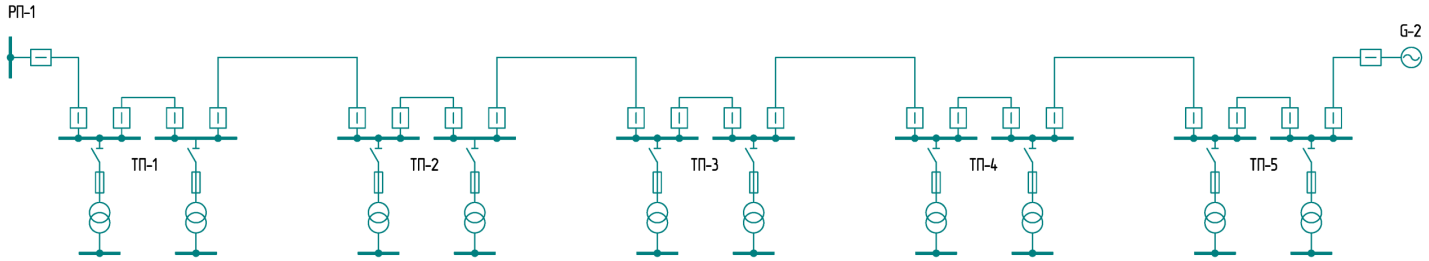


схема с двухсторонним питанием (распределенная генерация)

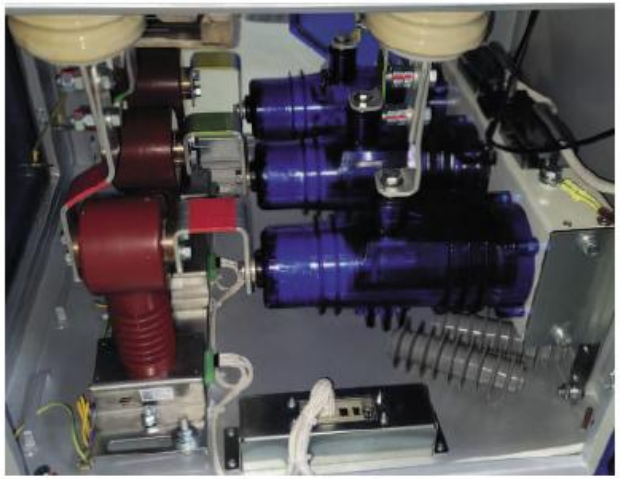


- изменение конфигурации и усложнение топологии
- развитие сетей с распределенной генерацией и возобновляемыми источниками энергии
- цифровой ретрофит ячеек 6-35 кВ
- применение нового коммутационного оборудования, измерительных систем и датчиков
- внедрение интеллектуальных систем учета и телемеханики
- применение схем электроснабжения с несколькими источниками и двухсторонним питанием
- новые требования к построению систем релейной защиты и автоматики

ЦКИТ + СВИ

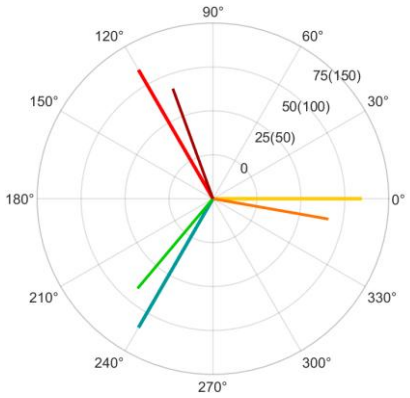
РЗА, учет ЭЭ, ПКЭ
телемеханика
…





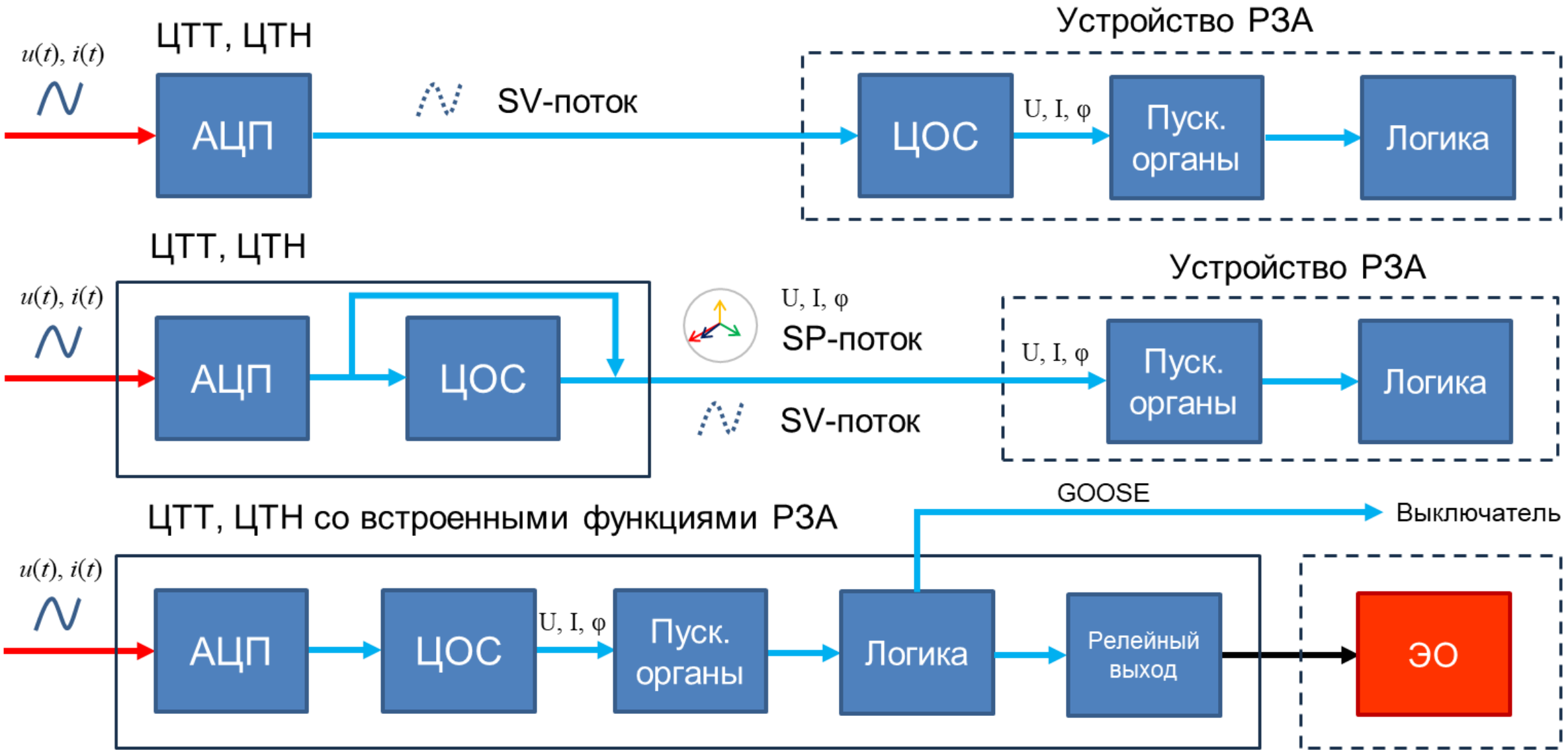
ЦКИТ цифровой комбинированный трансформатор напряжения и тока

СВИ технология синхронизированных векторных измерений (SP-потоки)

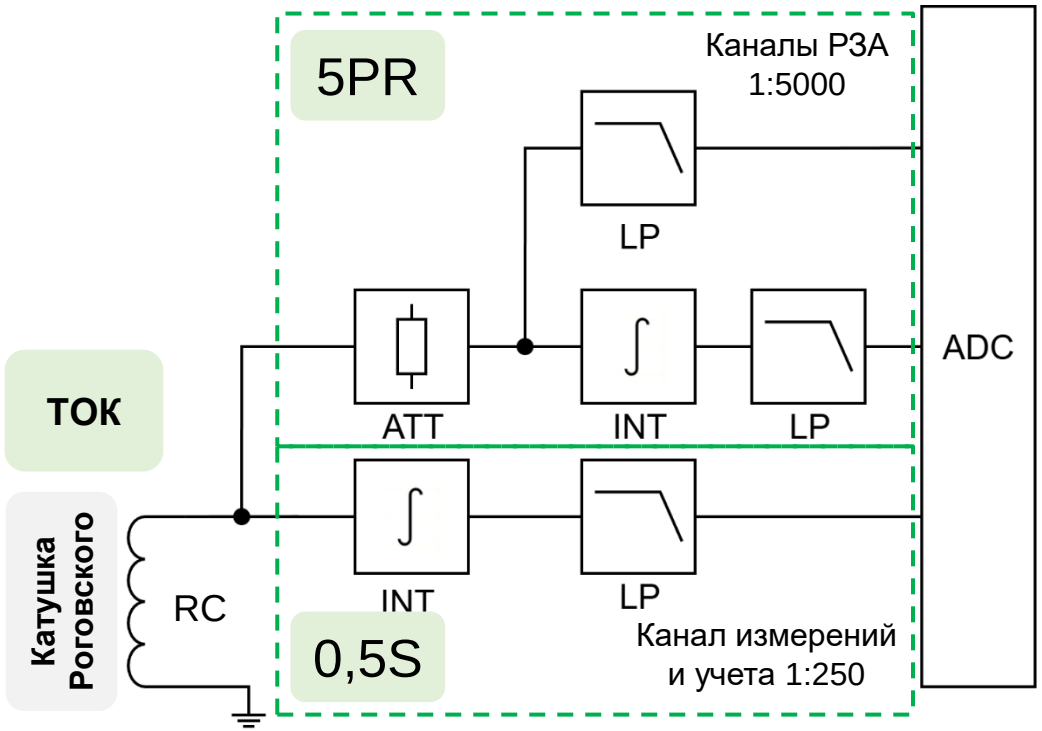


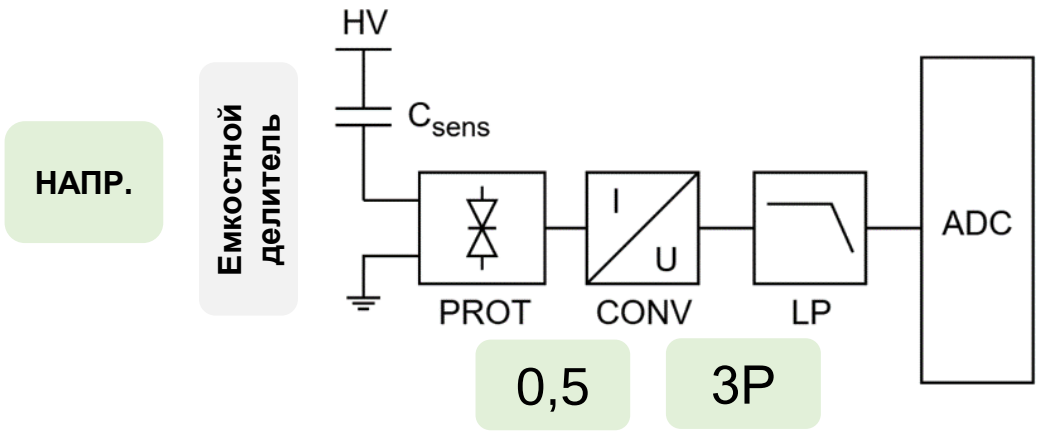


- ✓ внедрение реклоузеров и компактных цифровых ячеек
- ✓ комбинированные цифровые ТТ и ТН
- ✓ передача потоков синхровекторов (SP-потоков)
- ✓ многоуровневые системы РЗА
- ✓ распространение дистанционного принципа защиты
- ✓ обмен данными между системами автоматизации
- ✓ многофункциональные ИЭУ
- ✓ специализированные решения для сетей 6-35 кВ


u(t), i(t)
ЦТТ, ЦТН
АЦП
SV-поток
Устройство РЗА
ЦОС
U, I, φ
Пуск. органы
Логика
u(t), i(t)
ЦТТ, ЦТН
АЦП
ЦОС
U, I, φ
SP-поток
SV-поток
Устройство РЗА
U, I, φ
Пуск. органы
Логика
ЦТТ, ЦТН со встроенными функциями РЗА
GOOSE
Выключатель
u(t), i(t)
АЦП
ЦОС
U, I, φ
Пуск. органы
Логика
Релейный выход
ЭО

Цифровые комбинированные измерительные трансформаторы ECIT

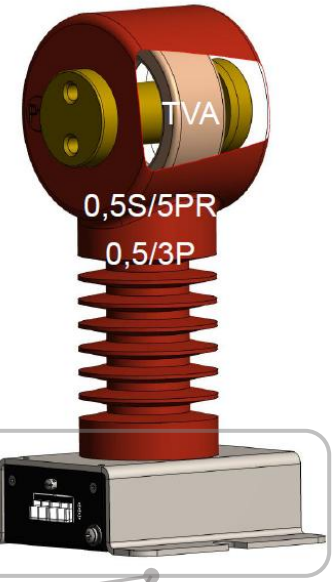




РЗА

ДЗ	МТЗ	ТЗНП
ЗМН	ЗПН	УРОВ
ЛЗШ	РАС	ОМП
ЗОП	АПВ	АЧР

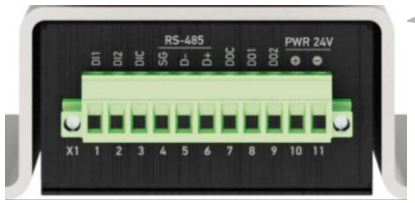
…



6-15 кВ



6-24 кВ





встроенные DI/DO

датчик дуги

параметры сети

учет электроэнергии

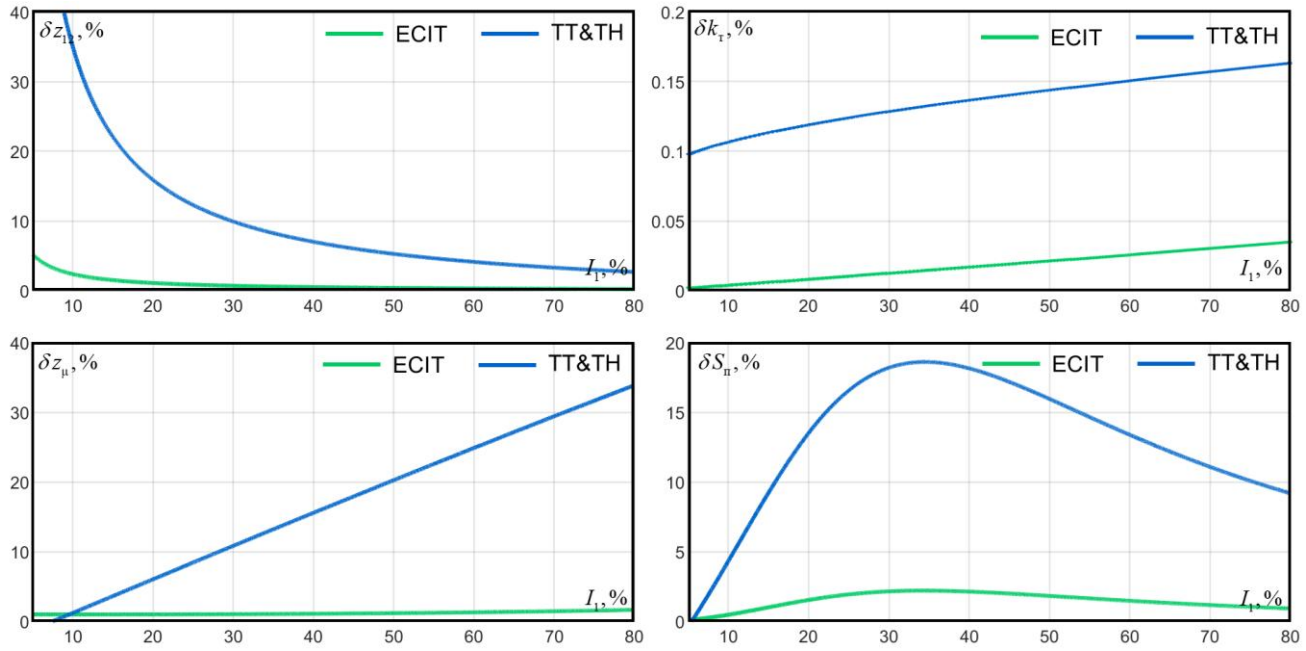


6-35 кВ

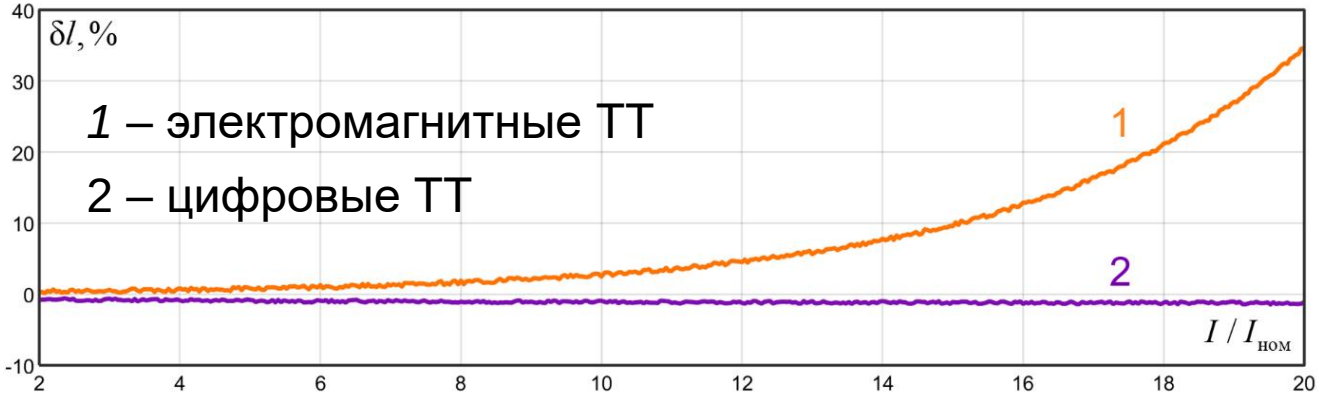
IEC 61850 SV/SP, GOOSE	**IEEE C37.118.2**	**Modbus TCP**	**HTTP**	
	IEC 60870-104	**SNTP**	**SNMP**	**PTPv2**

Преимущества ЦКИТ для защиты линии и силовых трансформаторов

точная оценка параметров схемы замещения СТ



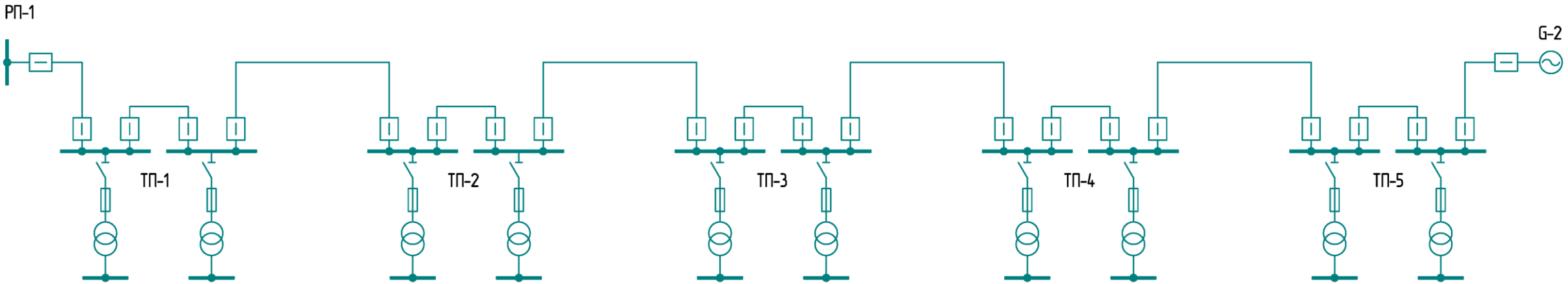
точная оценка параметров петли КЗ



- ✓ комбинированное исполнение (ТТ + ТН) с минимизацией взаимной угловой погрешности;
- ✓ широкий измерительный диапазон;
- ✓ отсутствие влияния вторичной нагрузки;
- ✓ отсутствие эффектов насыщения, остаточной намагниченности и феррорезонанса;
- ✓ высокая точность измерений при малых значениях напряжения и тока;
- ✓ фактический класс точности для релейной защиты по измерению тока – 0,5PR;
- ✓ самодиагностика и контроль исправности электронных компонентов и первичных преобразователей;
- ✓ передача до 3-х SV-потоков;
- ✓ передача потока синхровекторов (SP-поток);
- ✓ компактность.

Сравнение подходов к реализации защиты линии

Пример: сеть 10 кВ, кольцевая схема + двухстороннее питание



Хар-ка сети: длина линий 1 км, сечение 95 мм^2, токи КЗ в линиях в пределах 1,5-2,5 кА

Токовая ступенчатая (направленная) защита

ТО-1 без выдержки времени – неселективна

ТО-2, при $\Delta t_{срII}$ = 0,3 с, $t_{срII}$ > 1,5 с для головных участков

МТЗ, при $\Delta t_{срIII}$ = 0,3 с, $t_{срIII}$ > 3 с для головных участков

- неселективное действие ТО для всей схемы
- длительное протекание токов КЗ
- многократное АПВ для локализации участка КЗ

Дистанционная защита на базе ЦКИТ

ДЗ-1 – без выдержки времени

ДЗ-2 – $t_{срII}$ = 0,3 с, ближнее резервирование

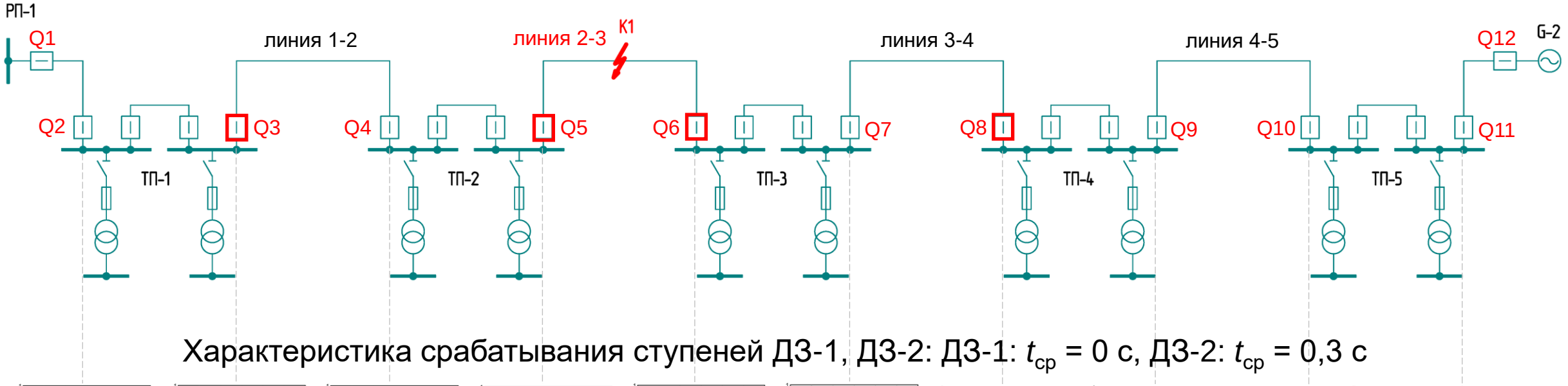
ДЗ-3 – дальнее резервирование

✓ высокая точность измерений $Z_{кз}$

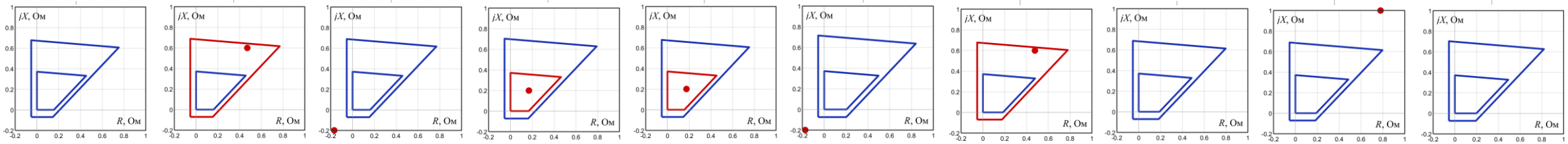
✓ разработанные алгоритмы для SP-потоков

Моделирование характеристик срабатывания ДЗ на базе ЦКИТ

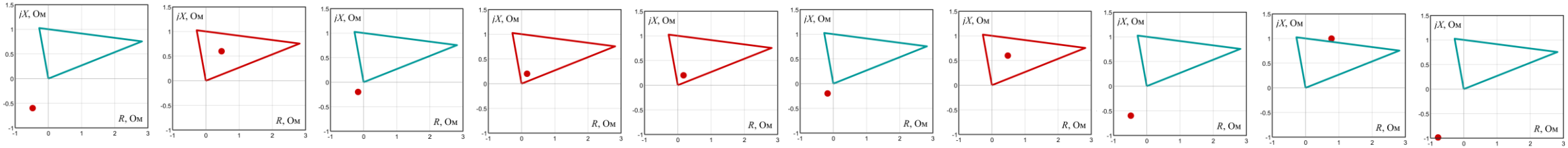
Пример: двухфазное КЗ в точке К1, линия 2-3



Характеристика срабатывания ступеней ДЗ-1, ДЗ-2: ДЗ-1: $t_{ср}$ = 0 с, ДЗ-2: $t_{ср}$ = 0,3 с



Характеристика срабатывания ступени ДЗ-3: ДЗ-3: $t_{ср}$ = $t_{ср.пред}$ + 0,3 с



Дистанционная защита линии на базе ЦКИТ и СВИ

Оценка сопротивления в общем виде и при КЗ в линии:

$$\hat{\underline{z}}(t)=\frac{\dot{U}_{\text{p}}(t)}{\dot{I}_{\text{p}}(t)+\underline{k}\dot{I}'_{\text{p}}(t)}$$

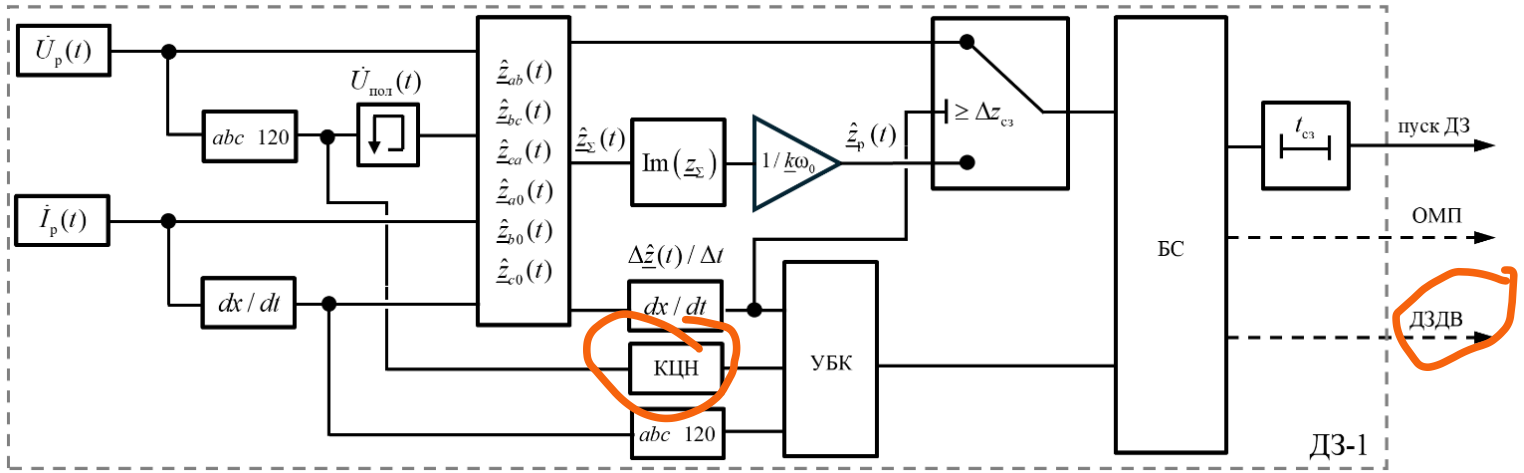
$$\hat{\underline{z}}(t)=\frac{1}{\underline{k}\omega_0}\operatorname{Im}\left(\frac{\dot{U}_{\text{p}}(t)}{\dot{I}_{\text{p}}(t)+\underline{k}\dot{I}'_{\text{p}}(t)}\right)$$

Применение двухсторонних измерений:

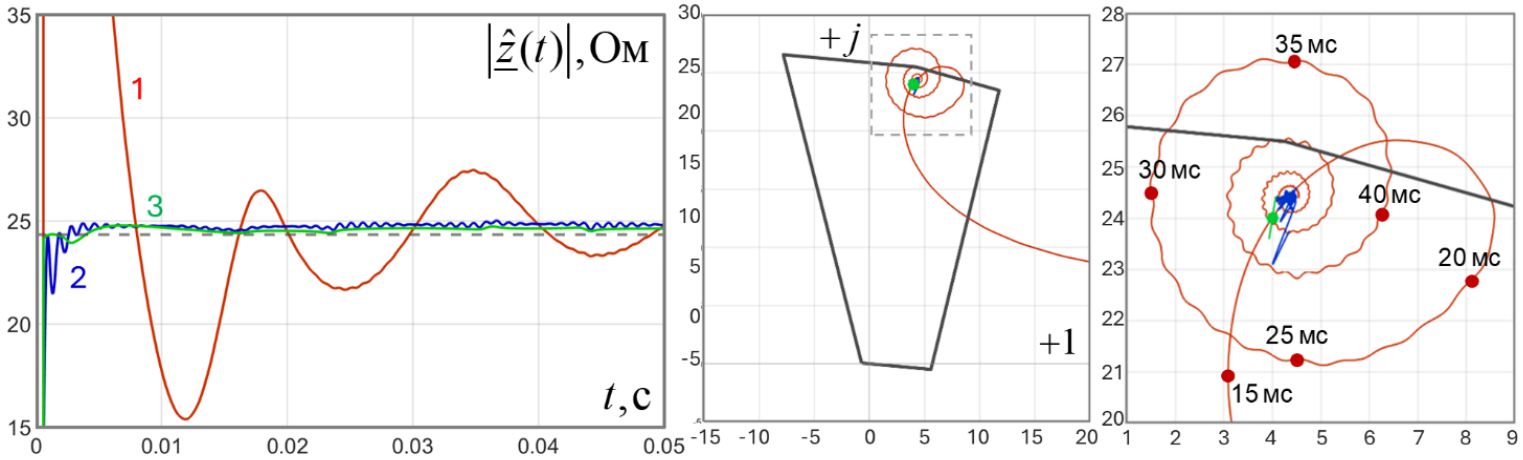
$$\hat{\underline{z}}(t)=\frac{\dot{U}_1(t)-\dot{U}_2(t)+\underline{z}\left(\dot{I}_2(t)+\underline{k}\dot{I}'_2(t)\right)}{\dot{I}_1(t)+\dot{I}_2(t)+\underline{k}\left(\dot{I}'_1(t)+\dot{I}'_2(t)\right)}$$

Особенности:

- учет переходного сопротивления в месте повреждения
- достоверная оценка сопротивления при наличии переходного процесса КЗ
- способы оценки с учетом и без учета емкости линии
- усовершенствованные алгоритмы работы УБК
- отсутствие насыщение ТТ



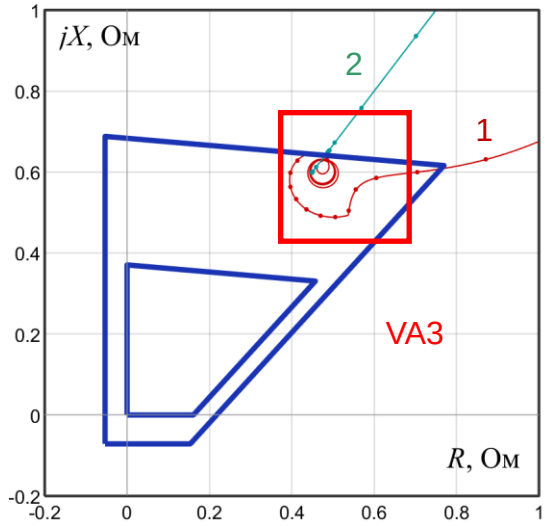
Структурная схема измерения сопротивления петли КЗ

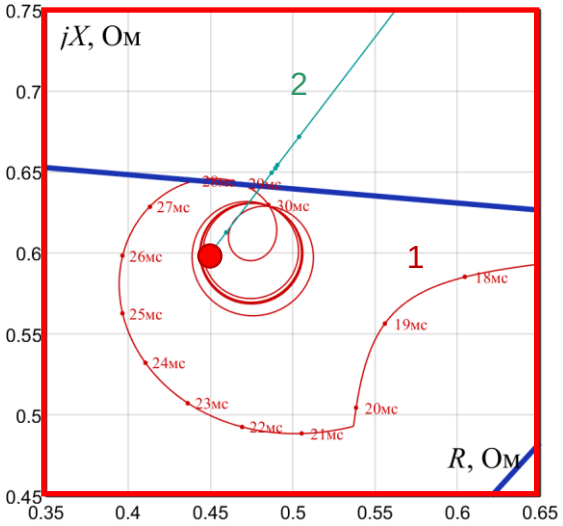


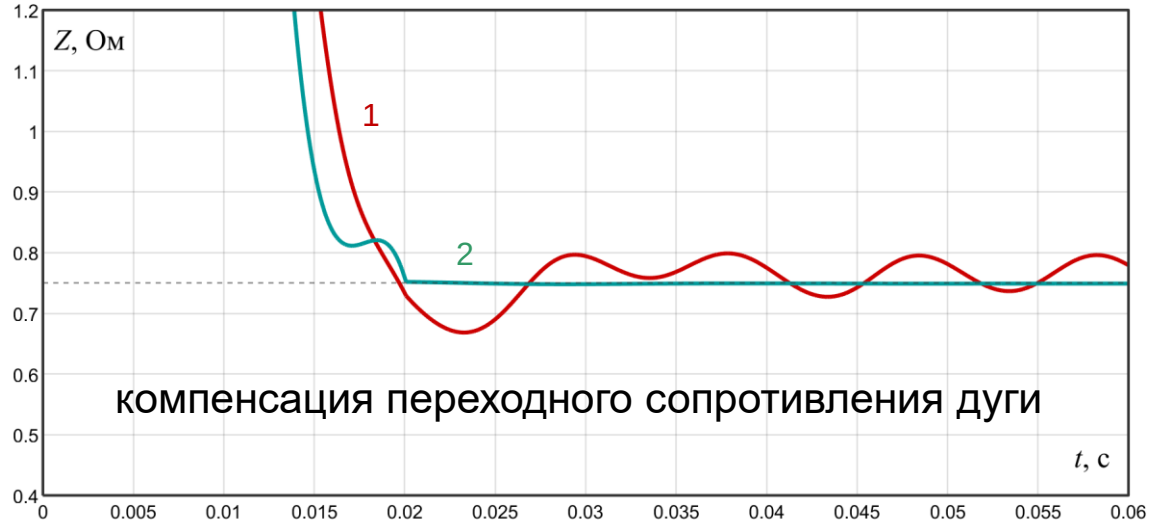
Оценка сопротивления петли КЗ:

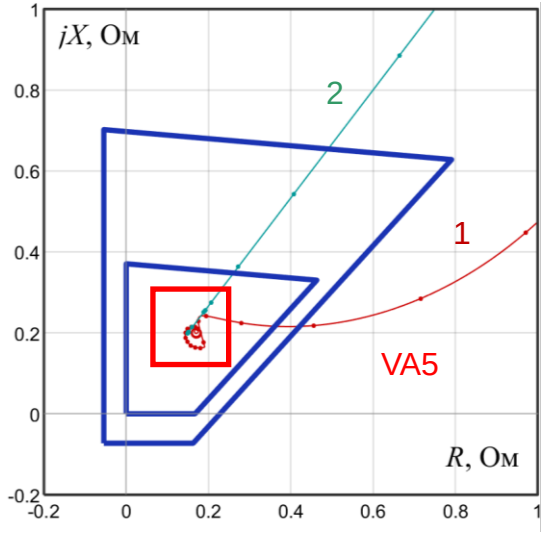
1 – традиционный способ, 2 – оценка без учета емкости, 3 – с учетом

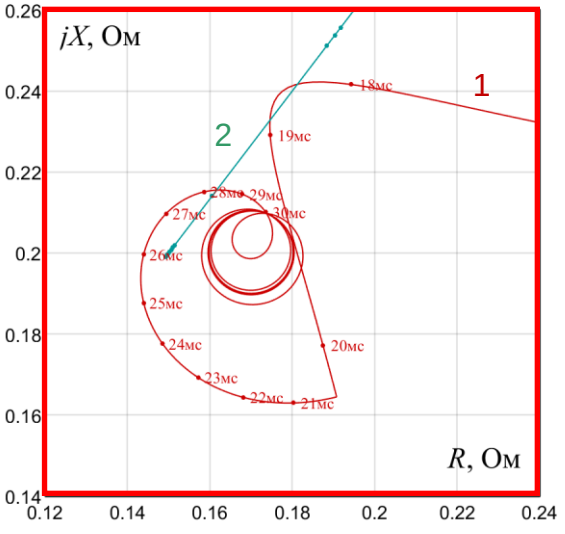
Моделирование характеристик срабатывания ДЗ на базе ЦКИТ













1 – традиционные ТТ и ТН, существующие алгоритмы оценки сопротивления петли КЗ

2 – ЦКИТ + разработанные алгоритмы дистанционной защиты на основе СВИ

Лабораторные испытания

Лабораторная установка:

ECIT-1 – цифровой ТТ, ТН со встроенной функцией дистанционной защиты

OMICRON – испытательное устройство

Эксперимент:

ECIT-1 производит оценку сопротивления петли КЗ разработанным способом

Параметры установки:

$U_н$ = 100 В, $I_к$ = 20 А, t = 0,2 с

Параметры линии:

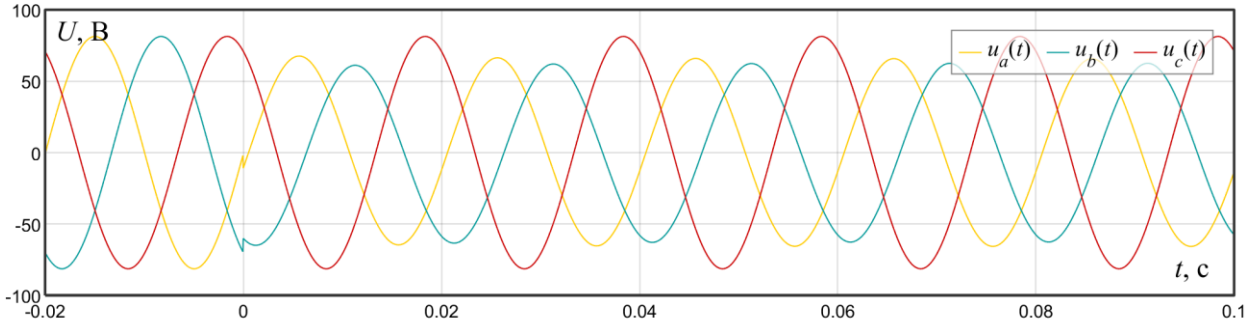
$R_{уд}$ = 0,15 Ом/км, $L_{уд}$ = 0,65 Ом/км, l = 10 км

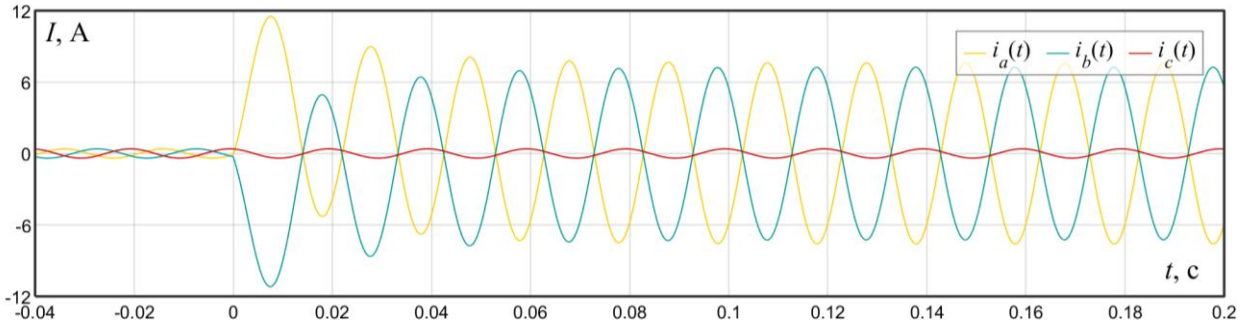
1 – оценка традиционным способом, теоретические значение

2 – оценка разработанным способом, теоретические значение

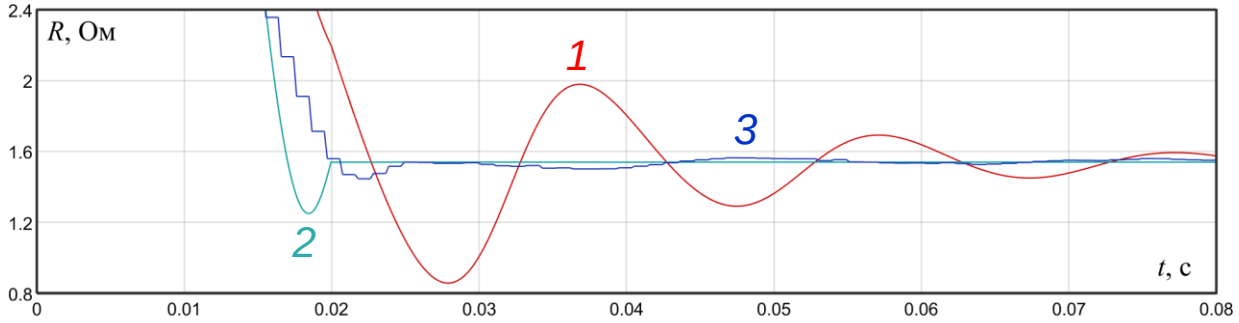
3 – оценка разработанным способом, измерение, выполненное в ECIT

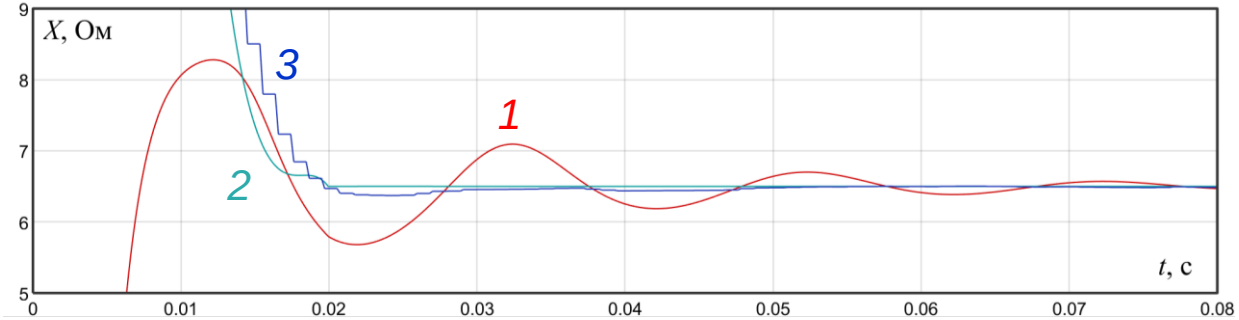
Осциллограмма подаваемых напряжений и токов





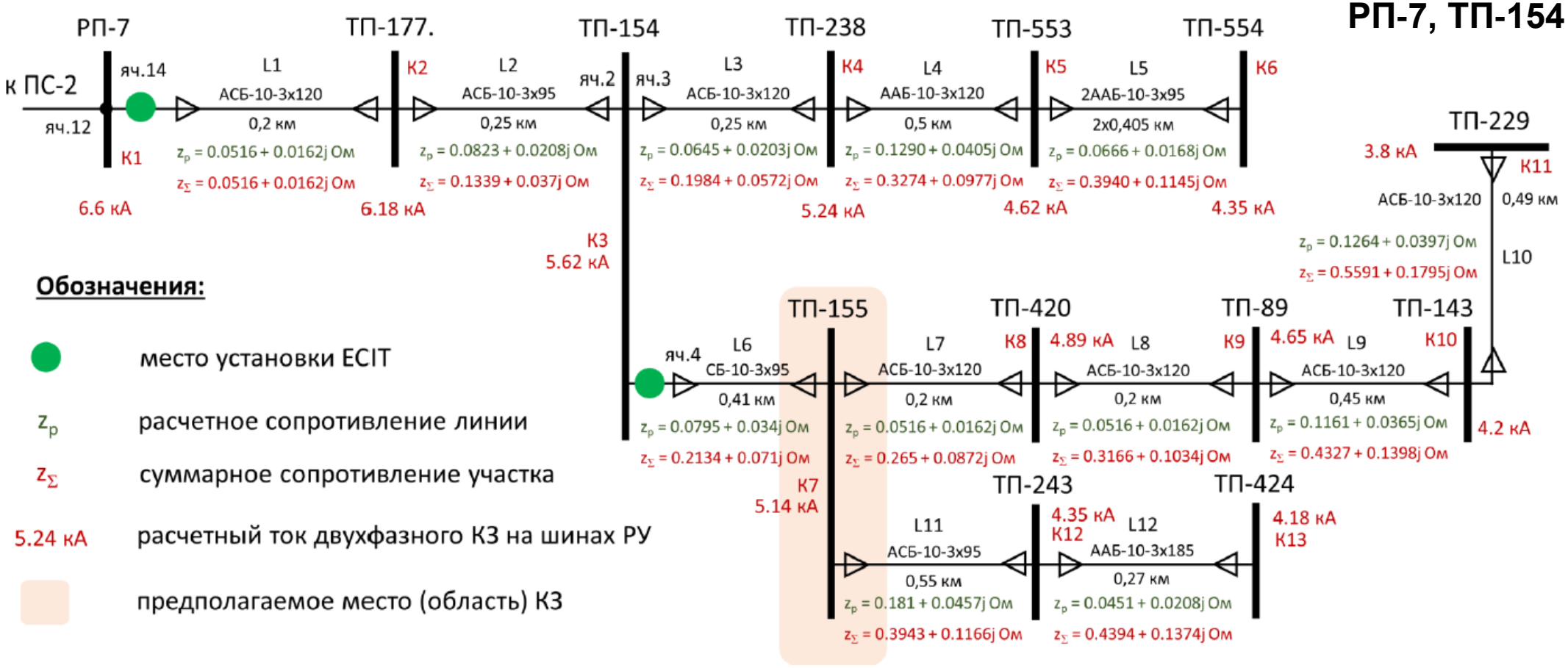
Результат оценки сопротивления петли КЗ





Осциллограммы событий в сети 6-10 кВ

РП-7, ТП-154 (Архэнерго)



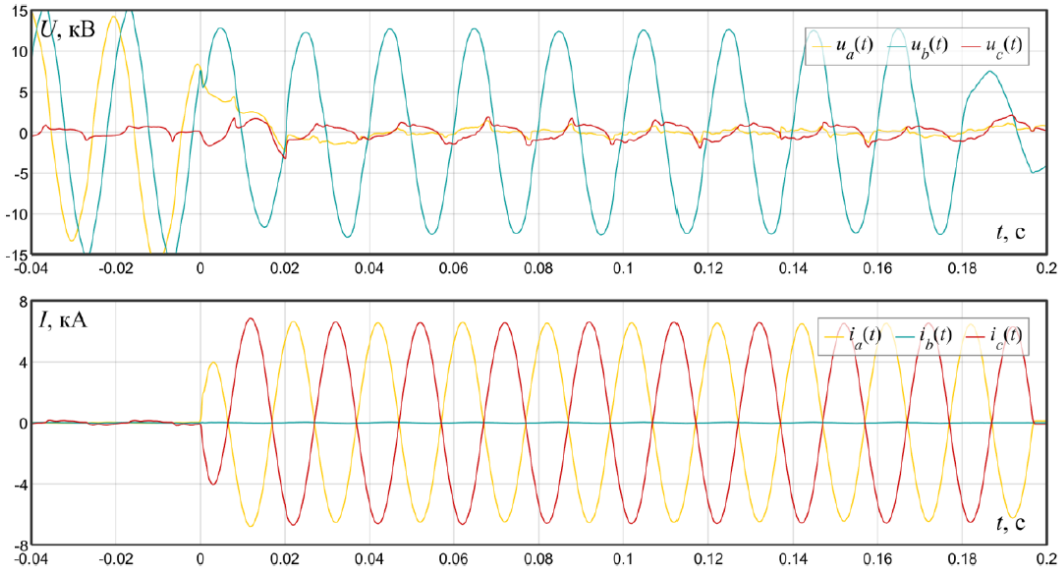
Обозначения:

- место установки ECIT
- z_p — расчетное сопротивление линии
- z_Σ — суммарное сопротивление участка
- 5.24 кА — расчетный ток двухфазного КЗ на шинах РУ
- предполагаемое место (область) КЗ

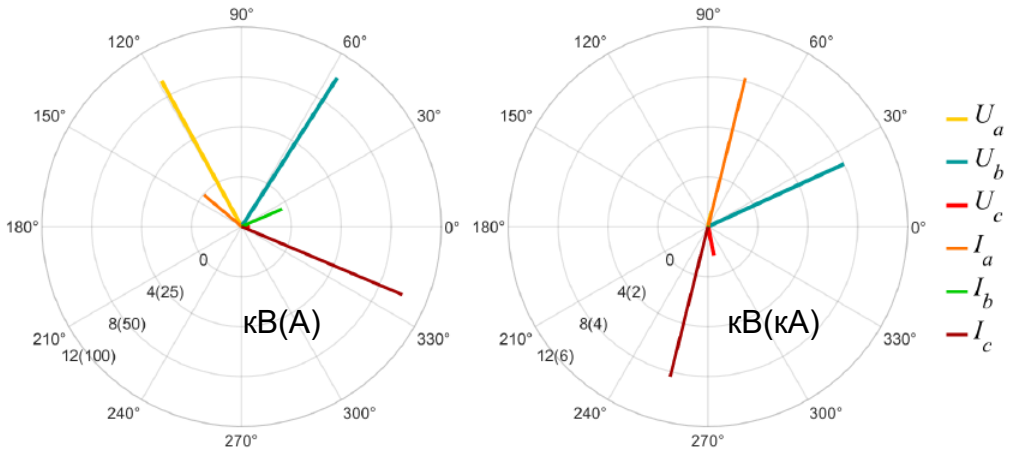
Важн.	Время возникновения	Время снятия	Период активности	Наименование	Тип
▣	01.12.2025 04:45:25.875	01.12.2025 04:45:25.875		РП-7 яч.12 - ES-Граф - КЗ фаз B и C	ТС
▣	01.12.2025 05:03:08.440	01.12.2025 05:03:08.654	__:__:00	ТП-154 яч.4 - КЗ в фазе A (датчик)	ТС
▣	01.12.2025 05:03:08.440	01.12.2025 05:03:08.654	__:__:00	ТП-154 яч.4 - КЗ в фазе C (датчик)	ТС

Осциллограммы событий в сети 6-10 кВ

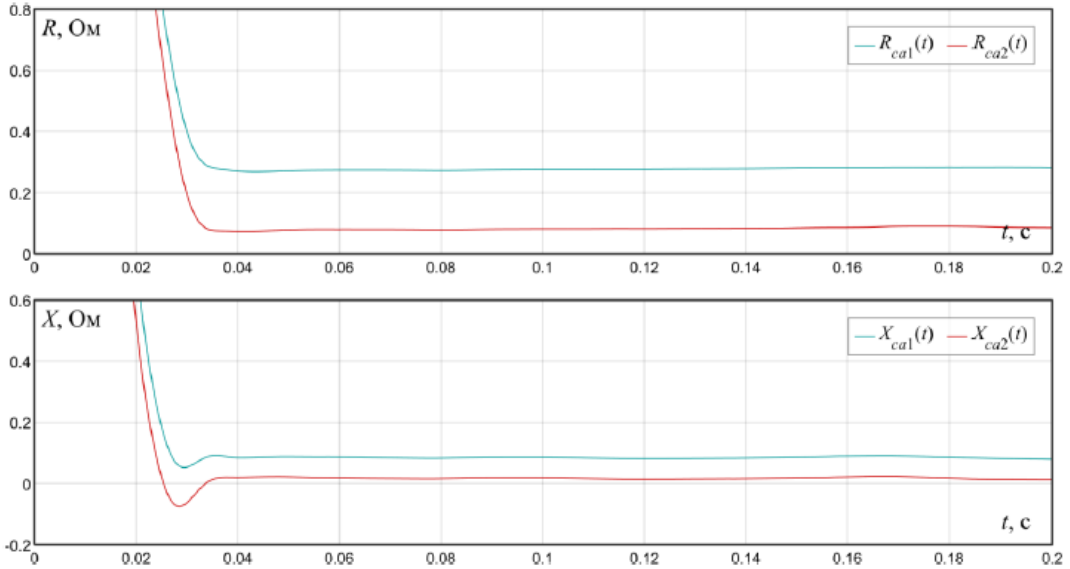
Осциллограмма напряжений и токов при КЗ



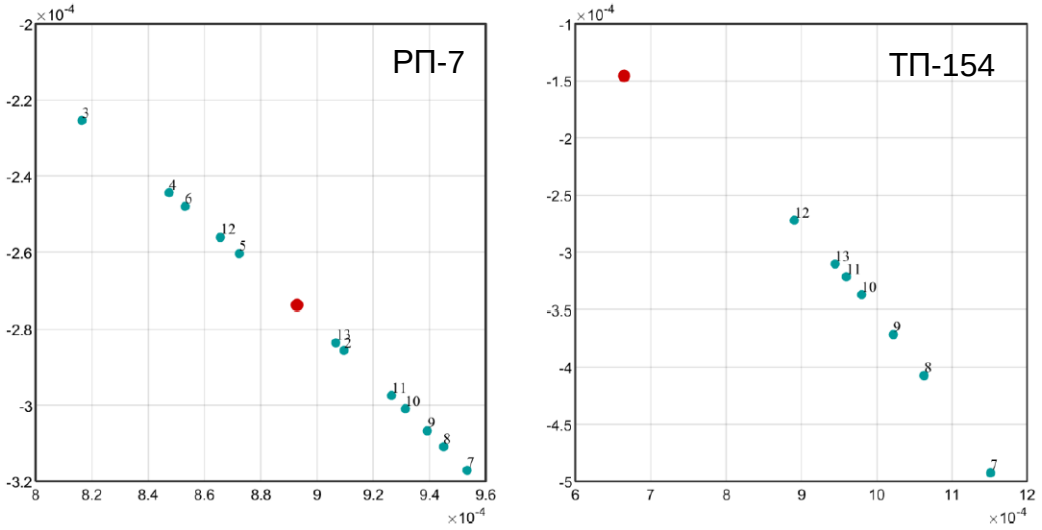
Векторная диаграмма до и во время КЗ



Расчет сопротивления петли КЗ

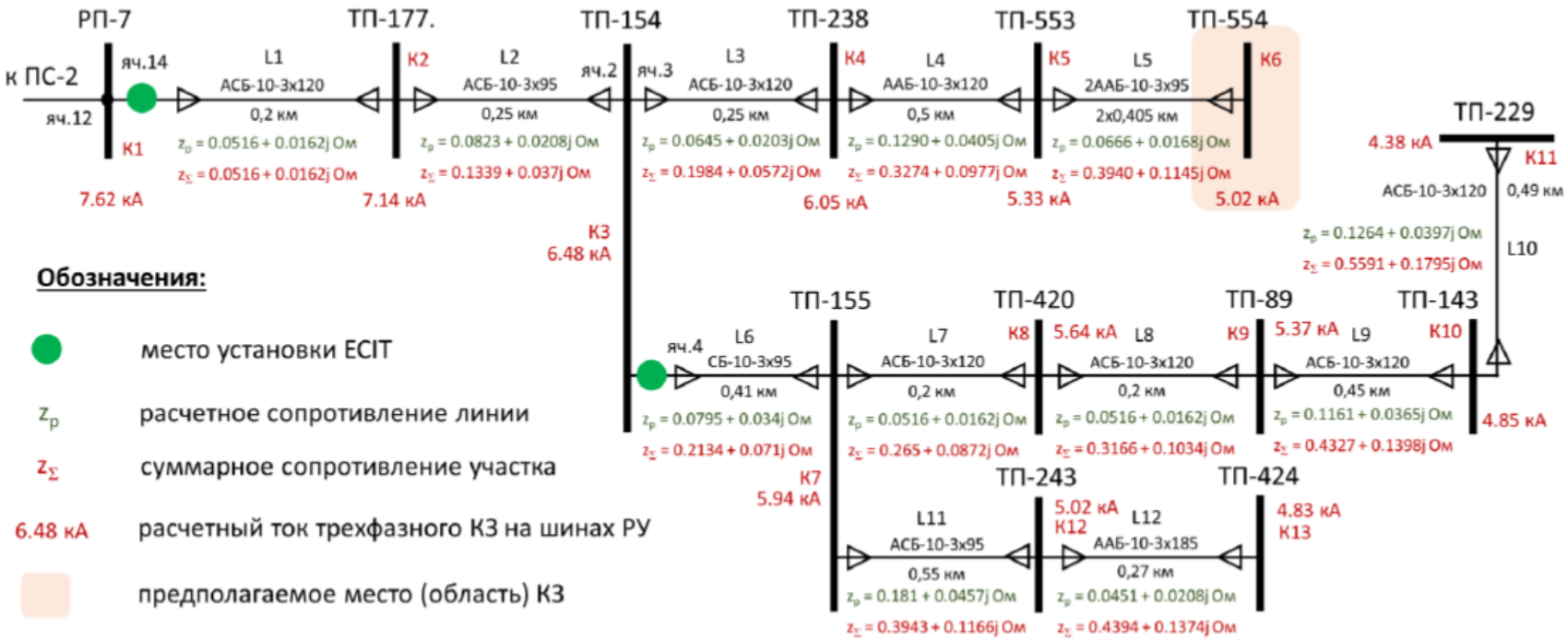


Уточнение места повреждения по комплексному коэффициенту линии



Осциллограммы событий в сети 6-10 кВ

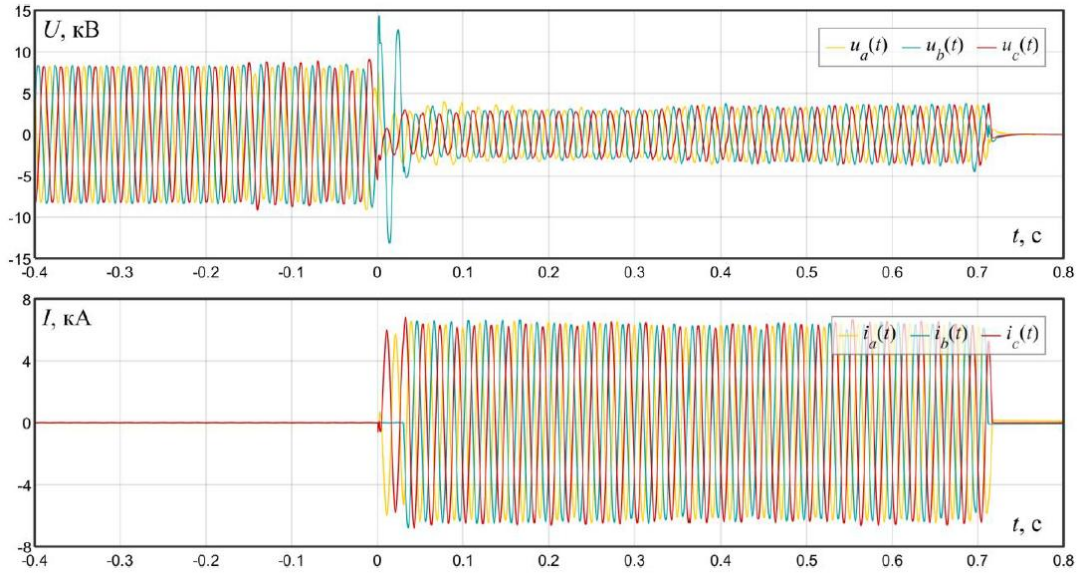
РП-7, ТП-154 (Архэнерго)



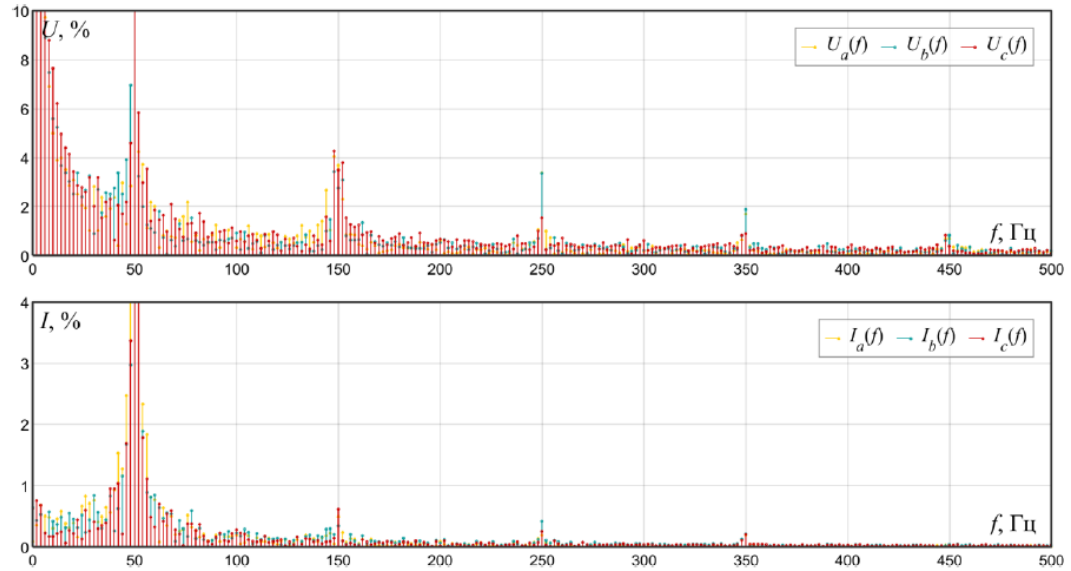
Важн.	Время возникновения	Время снятия	Период активности	Наименование	Тип
▣	14.03.2026 01:53:45.964	14.03.2026 01:53:46.681	--:--:00	ТП-154 яч.2 - КЗ в фазе А (датчик)	ТС
▣	14.03.2026 01:53:45.964	14.03.2026 01:53:46.692	--:--:00	ТП-154 яч.2 - КЗ в фазе С (датчик)	ТС
▣	14.03.2026 01:53:45.964	14.03.2026 01:53:46.694	--:--:00	ТП-154 яч.3 - КЗ в фазе А (датчик)	ТС
▣	14.03.2026 01:53:45.964	14.03.2026 01:53:46.684	--:--:00	ТП-154 яч.3 - КЗ в фазе С (датчик)	ТС
▣	14.03.2026 01:53:45.965	14.03.2026 01:53:46.694	--:--:00	РП-7 яч.12 - КЗ в фазе А (датчик)	ТС
▣	14.03.2026 01:53:45.965	14.03.2026 01:53:46.695	--:--:00	РП-7 яч.12 - КЗ в фазе С (датчик)	ТС
▣	14.03.2026 01:53:45.965	14.03.2026 01:53:46.695	--:--:00	РП-7 яч.14 - КЗ в фазе С (датчик)	ТС

Осциллограммы событий в сети 6-10 кВ

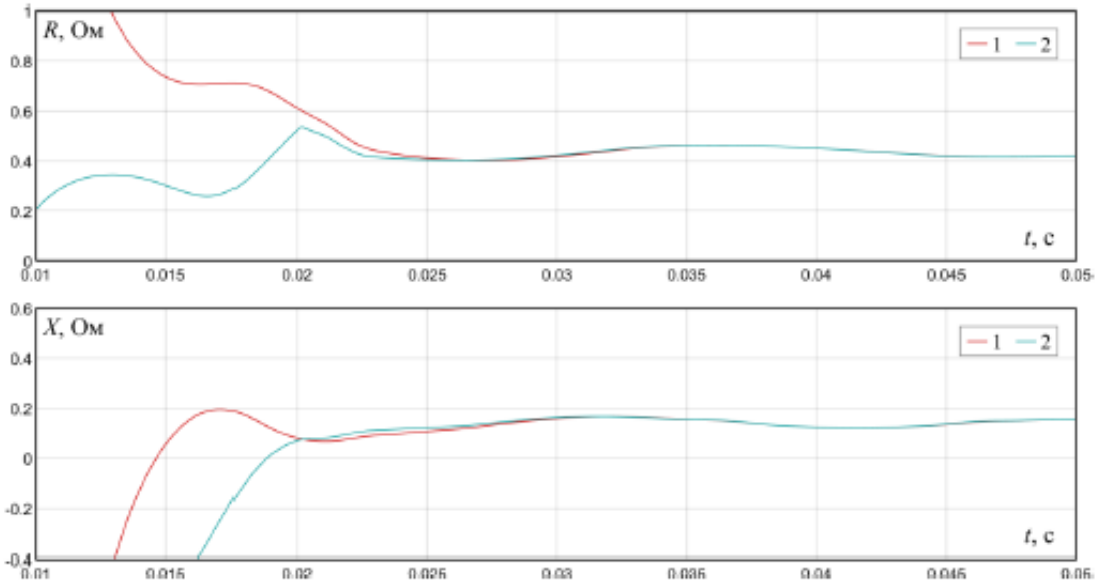
Осциллограмма напряжений и токов при КЗ



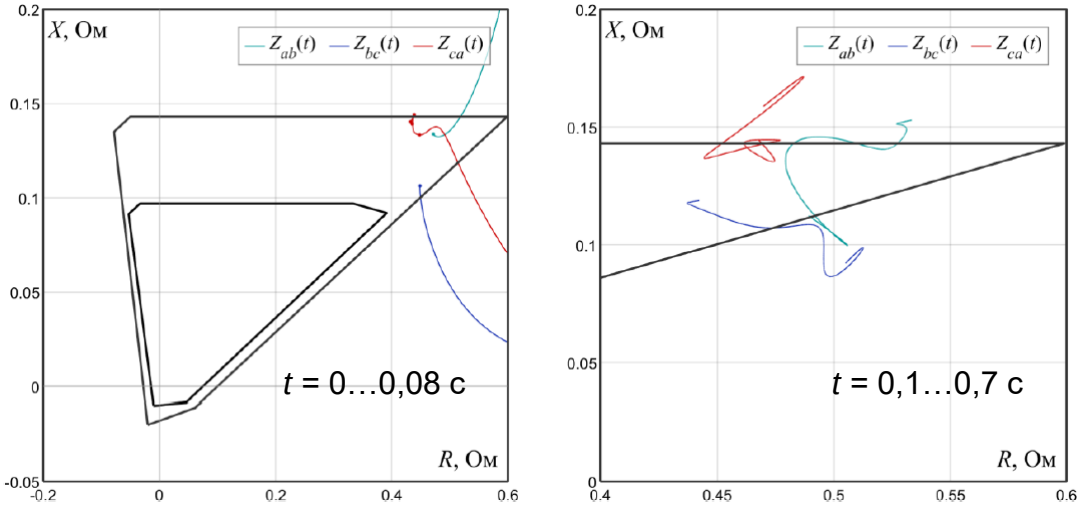
Амплитудный спектр напряжений и токов при КЗ



Расчет сопротивления петли КЗ



Годограф сопротивлений



РЗА присоединения на базе ЦКИТ

- проект 2025 г.
- РП-7, ПАО «Россети СЗ», г. Архангельск



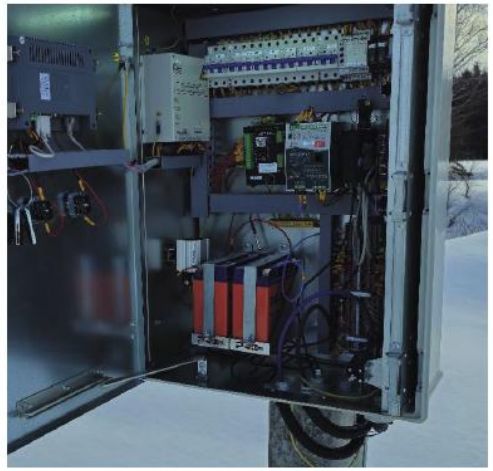




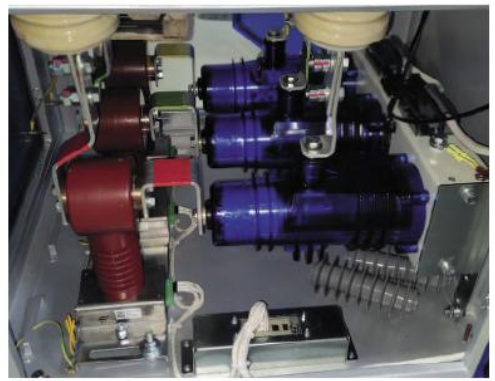
ЦКИТ в составе реклоузера

- проекты 2025-2026 гг.
- АО «РЭС» («Россети Новосибирск»)
- 21 пункт секционирования ВЛ 6 кВ









ВЫВОДЫ:

1. Развитие сетей среднего напряжения ведет к необходимости пересмотра требований к построению систем релейной защиты и автоматики.

2. Классические принципы построения РЗА 6-35 кВ на базе токовых принципов становятся менее эффективными и не обеспечивают требуемого быстродействия и селективности.

3. ЦКИТ позволяют обеспечить реализацию новых подходов к построению защиты линии, в частности, распространить применение усовершенстованного дистанционного принципа за счет технологии СВИ.

4. В электронном блоке ЦКИТ есть возможность реализовать набор функций РЗА, которые могут быть использованы как резервные функции защиты и автоматики линии, так и как основные.

БЛАГОДАРИМ ЗА ВНИМАНИЕ!

ens
инженерный центр
энергосервис

Ульянов Дмитрий Николаевич

директор департамента энергетических технологий
ООО ”Инженерный центр ”Энергосервис”

аспирант кафедры
«Электроэнергетика и электротехника»
Северный (Арктический) федеральный университет

d.ulyanov@ens.ru

