



инженерный центр  
**энергосервис**



# ТЕХНОЛОГИЯ СВИ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

**С.А. Пискунов, А.В. Мокеев**

Панельная дискуссия «Развитие технологий синхронизированных векторных измерений  
для задач предиктивной диагностики»



## ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ В XXI ВЕКЕ

**XI Всероссийская научно-практическая конференция**

21-23 мая 2024 года



# ТЕХНОЛОГИЯ СВИ

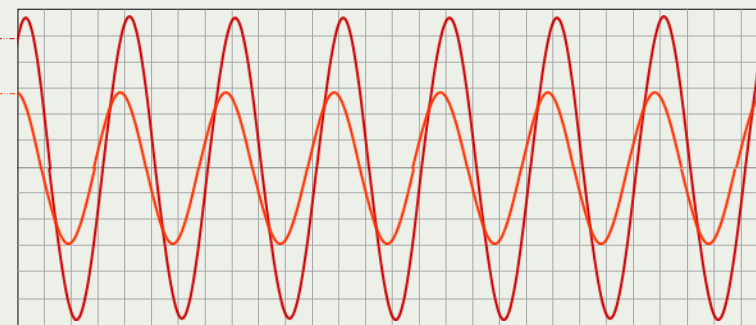
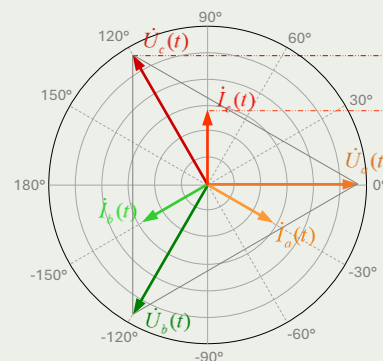
## Синхронизированные векторные измерения (СВИ) –

это совокупность векторных и скалярных параметров электроэнергетического режима, измеренных и рассчитанных в заданном объеме, с заданной дискретизацией в однозначно определенные моменты времени, синхронизированные с помощью глобальных навигационных спутниковых систем.

### Преимущества:

- ✓ высокая разрешающая способность
- ✓ высокий темп передачи данных ( $\geq 50$  раз/с)
- ✓ высокая точность синхронизации времени (1 мкс)
- ✓ распределенная обработка измерений
- ✓ дополнительные возможности для анализа измеряемого сигнала в частотной области
- ✓ применение синтезированных цифровых фильтров

$$\dot{U}_a(t), \dot{U}_b(t), \dot{U}_c(t), \dot{I}_a(t), \dot{I}_b(t), \dot{I}_c(t), f(t)$$



### Особенности:

- быстрый расчет более 100 параметров режима присоединения
- расчет эквивалентных синхровекторов напряжения и тока
- расчет параметров присоединения с учетом высших гармоник
- оценка параметров схемы замещения и параметров эквивалентной энергосистемы





# НАПРАВЛЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ

## Общие направления

- системы мониторинга переходных режимов (СМПР, WAMS)
- оценка состояния энергосистем (WACS)
- мониторинг низкочастотных колебаний (НЧК)
- анализ работы системных регуляторов (СМСР)
- идентификация параметров линий, трансформаторов и т.д.
- локализация повреждений
- релейная защита и автоматика (в т.ч. WAPS)
- режимная и противоаварийная автоматика
- системы мониторинга состояния электрооборудования и коммутационной аппаратуры
- системы управления, мониторинга, релейной защиты и автоматики (WAMPACS)

## Международная оценка (NASPI, 2022 г.)

Обозначение	Описание	Уровень	Оценка
AG13	Применение для работы microgrid	высокий	1.36
AG11	Обнаружение и локализация повреждений	высокий	1.32
AG2	Мониторинг сети и оборудования	высокий	1.24
AG14	Управление нагрузкой сети, АЧР	высокий	1.23
AG4	Визуализация переходных процессов	высокий	1.23
AG6	Управление ЭС в режиме реального времени	средний	1.12
AG5	Управление распределенной генерацией	средний	1.09
AG12	Новые принципы релейной защиты	средний	1.07
AG10	Управление устойчивостью ЭС	средний	1.06
AG16	Снижение технических и коммерческих потерь	средний	1.03
AG8	Системное планирование	средний	1.02
AG19	Анализ баланса мощности	средний	1.01
AG1	Управление параметрами режима	средний	0.98
AG7	Повышение надежности и анализ устойчивости	средний	0.93
AG15	Улучшенная автоматизация РЭС	средний	0.90
AG3	Управление производственными активами	средний	0.89
AG17	Управление транспортной инфраструктурой	средний	0.87
AG9	Электромобили	средний	0.80
AG18	Единое системное планирование и анализ сети	низкий	0.70



# ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ ГЭС

№ п/п	Характеристика	Описание	Применение СВИ
1	Высокие требования к надежной работе сетей собственных нужд (СН)	Обеспечение эффективной работы релейной защиты сетей СН	Релейная защита на основе измерения синхровекторов
2	Большая установленная мощность гидроэлектростанций, работа в пиковой и полупиковой части графика системы	Выдача мощности на высоком уровне напряжения (220-750 кВ), большая инертность системы	Мониторинг переходных режимов (СМПР), выявление источников низкочастотных колебаний (НЧК)
3	Наличие нескольких гидроагрегатов, работающих синхронно	Автоматическая система управления возбуждением	Мониторинг работы регуляторов возбуждения (СМСР), предупреждение развития НЧК
4	Территориальная разобщенность общестанционных механизмов собственных нужд	Протяженные сети СН 6-10 кВ, компенсация тока ОЗЗ	Защита от ОЗЗ, система локализации ОЗЗ
5	Несколько рабочих и резервных трансформаторов СН	секционирование, обеспечение надежности электроснабжения	Мониторинг состояния трансформаторов СН
6	Ответственные электродвигатели управления задвижек и колонок дистанционного управления (КДУ)	Автоматические системы управления механизмами задвижек	Автоматика и управления



# РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА

- традиционное представление электрических величин переходных процессов:  $i(t), u(t)$
- для установившегося режима линейной электрической цепи широко распространен метод комплексных амплитуд:  $\dot{I}, \dot{U}$

- электрические величины переходного процесса могут быть описаны в **синхровекторах процесса**:

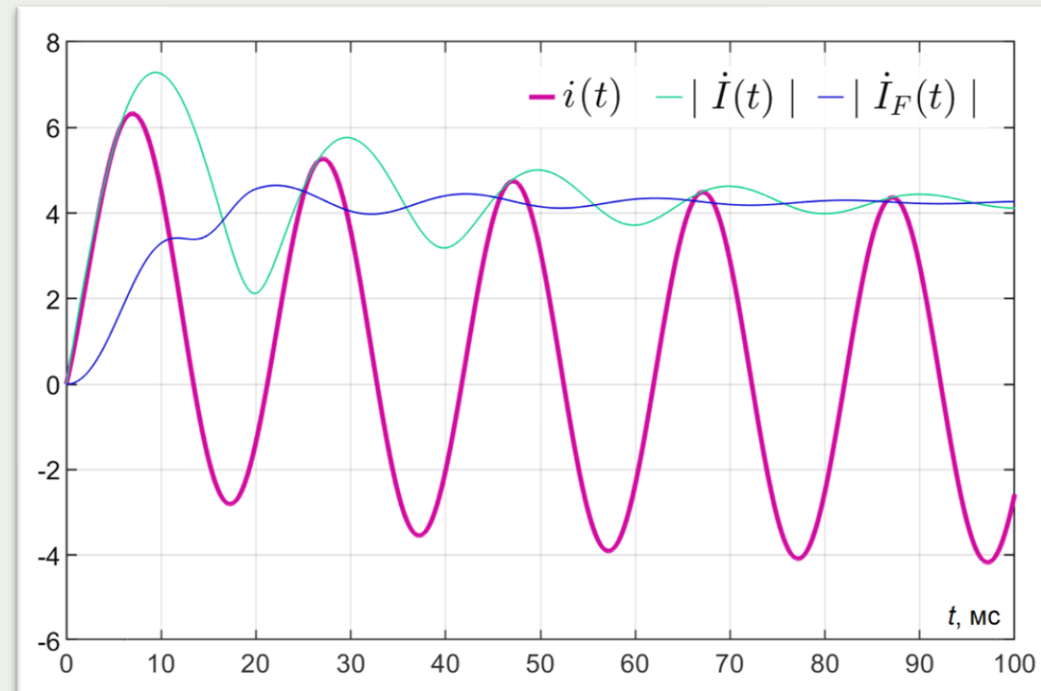
$$i(t) \rightarrow \dot{I}(t)e^{j\omega_0 t}, u(t) \rightarrow \dot{U}(t)e^{j\omega_0 t}$$

- для представления гармонических компонент сигнала возможен расчет **эквивалентных синхровекторов**:

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

$$\sum_{m=1}^M (2m+1) \dot{U}_{0(2m+1)}(t) = \dot{U}_{0me}(t), C_0 = \frac{\dot{I}_{0e}(t)}{j\omega_0 \dot{U}_{0me}(t) + \dot{U}'_{0e}(t)}$$

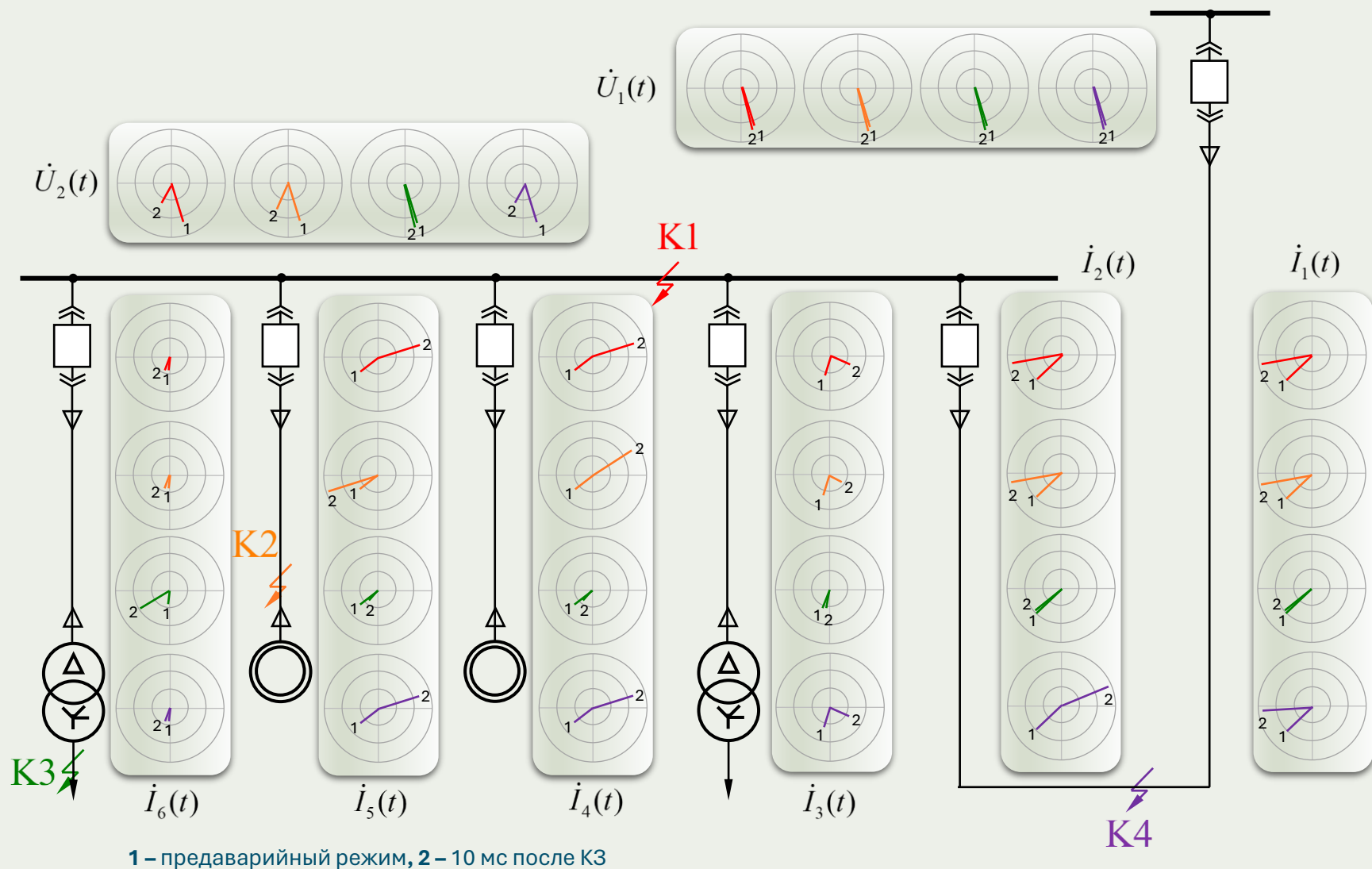
- анализ синхровекторов переходных процессов позволяет разрабатывать эффективные алгоритмы для **устройств релейной защиты**



- $i(t)$  - мгновенные значения,
- $\dot{I}(t)$  - синхровектор процесса,
- $\dot{I}_F(t)$  - оценка синхровектора (принужденная составляющая)



# ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА



1 – предаварийный режим, 2 – 10 мс после К3

## Сборные шины

$$I_{д}(t) = |\dot{I}_2(t) - \dot{I}_3(t) - \dot{I}_4(t) - \dot{I}_5(t) - \dot{I}_6(t)|$$

## Ввод

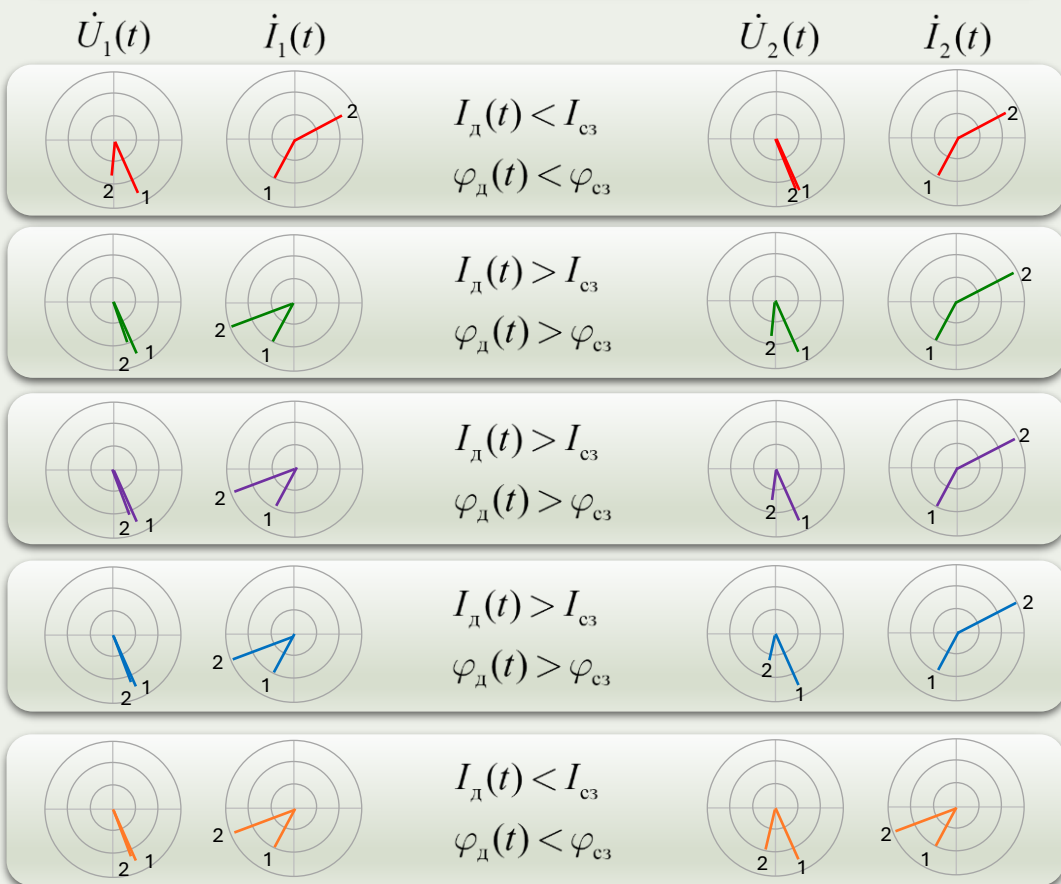
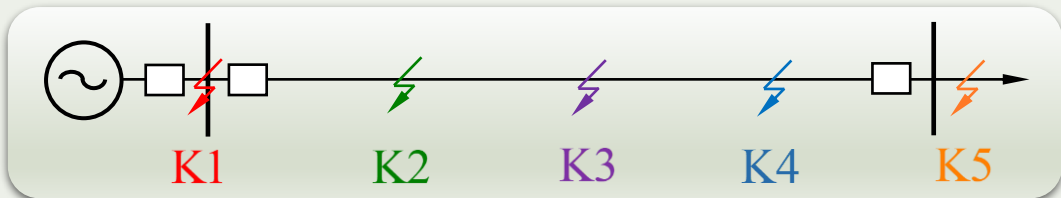
$$I_{д}(t) = |\dot{I}_1(t) - \dot{I}_2(t)|$$

- защита с абсолютной селективностью
- высокое быстродействие
- дополнительные параметры срабатывания



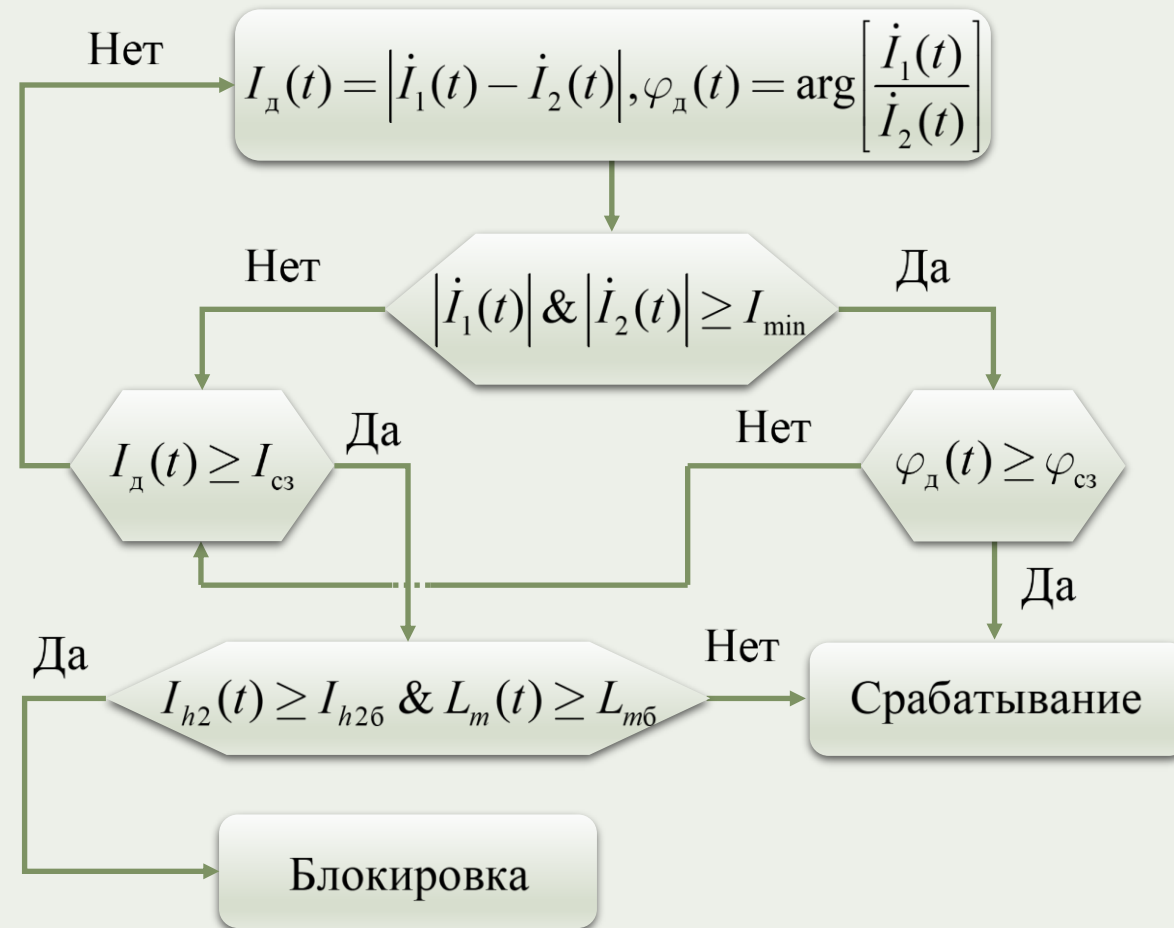
# ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА

## Линия



1 – предаварийный режим, 2 – 10 мс после КЗ

## Силовой трансформатор





# ДИСТАНЦИОННАЯ ЗАЩИТА

- точная оценка сопротивления петли КЗ при электромагнитных и электромеханических переходных процессах, в т.ч. при их сочетании
- исключение влияния нелинейного сопротивления дуги, дополнительные параметры для распознавания вида и типа повреждения

## Односторонние измерения

№	Наименование	Выражение
1	Модель энергосистемы	
2	Оценка комплексного сопротивления при междуфазных КЗ	$\hat{z}_k(t) = \frac{\dot{U}(t)}{\dot{I}(t) + k_1 \dot{I}'(t)}, \dot{I}'(t) = \frac{d\dot{I}(t)}{dt}, k_1 = \frac{L_{1уд}}{z_{1уд}}$
	Расстояние до точки КЗ	$\hat{l}_k(t) = \frac{\dot{U}(t)}{z_{уд} \dot{I}(t) + L_{уд} \dot{I}'(t)}$
3	Оценка комплексного сопротивления при междуфазных КЗ с компенсацией влияния дуги	$\hat{z}_\Sigma(t) = \frac{\dot{U}(t)}{\dot{I}(t) + k_1 \dot{I}'(t)}, \hat{z}_\Sigma(t) = z_k(t) + R_d(t)$ $\hat{R}_d(t) = \text{Re}(\hat{z}_\Sigma(t)) - \text{Im}(\hat{z}_\Sigma(t)) \frac{R_{уд}}{L_{уд}}, \hat{z}_k(t) = \hat{z}_\Sigma(t) - \hat{R}_d(t)$
4	Оценка комплексного сопротивления при однофазных КЗ	$\hat{z}_{A0}(t) = \frac{\dot{U}_A(t)}{\dot{I}_A(t) + k_0 3\dot{I}_0(t) + k_1 \dot{I}'_A(t) + k_{01} 3\dot{I}'_0(t)}$ $k_0 = \frac{z_{0уд} - z_{1уд}}{3z_{1уд}}, k_1 = \frac{L_{1уд}}{z_{1уд}}, k_{01} = \frac{L_{0уд} - L_{1уд}}{3z_{1уд}}$

## Двухсторонние измерения

№	Наименование	Выражение
1	Модель энергосистемы	
2	Оценка комплексного сопротивления	$\hat{z}_{k1}(t) = \frac{\Delta \dot{U}(t) + z \dot{I}_2(t) + L \dot{I}'_2(t)}{\dot{I}(t) + k \dot{I}'(t)}, \Delta \dot{U}(t) = \dot{U}_1(t) - \dot{U}_2(t),$ $\dot{I}(t) = \dot{I}_1(t) + \dot{I}_2(t), \dot{I}'(t) = \dot{I}'_1(t) + \dot{I}'_2(t)$
	Расстояние до точки КЗ	$\hat{l}_{k1}(t) = \frac{\Delta \dot{U}(t) + z \dot{I}_2(t) + L \dot{I}'_2(t)}{z_{уд} \dot{I}(t) + L_{уд} \dot{I}'(t)}$
3	Оценка комплексного сопротивления линии в нормальном режиме и при внешних КЗ	$\hat{z}(t) = \frac{\Delta \dot{U}(t)}{\dot{I}(t) + k_1 \dot{I}'(t)}, \dot{I}(t) = \dot{I}_1(t) \text{ или } \dot{I}(t) = \frac{\dot{I}_1(t) + \dot{I}_2(t)}{2}$

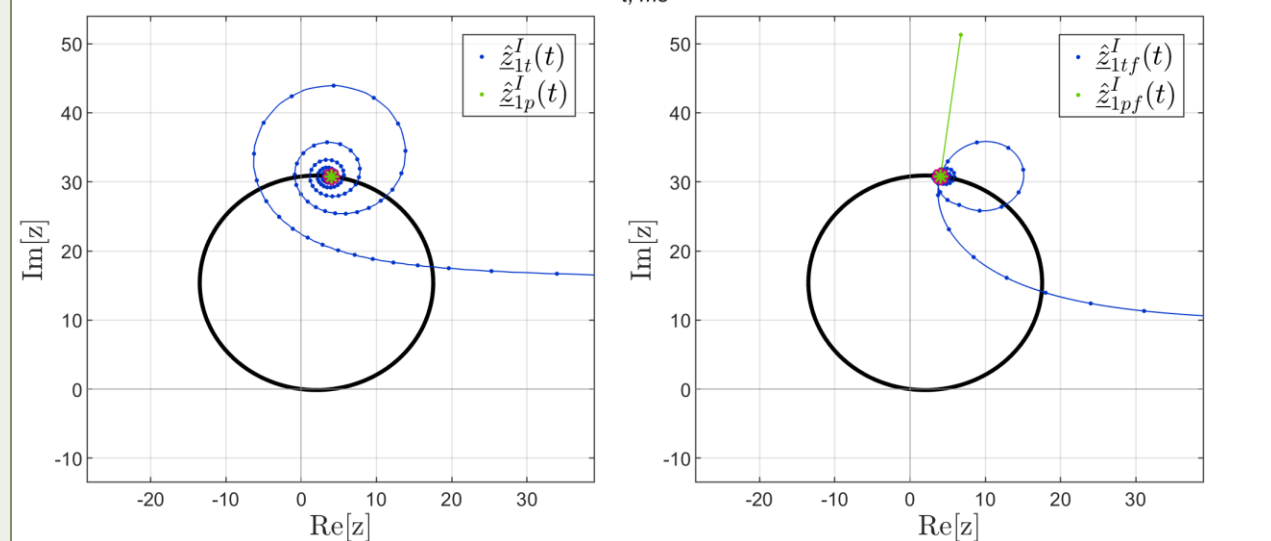
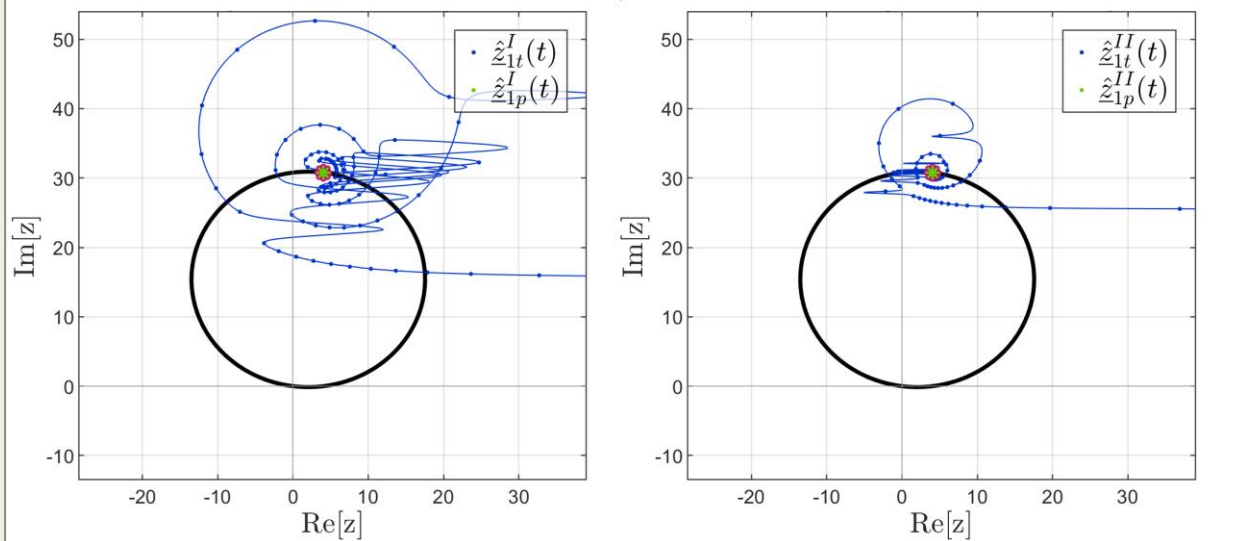
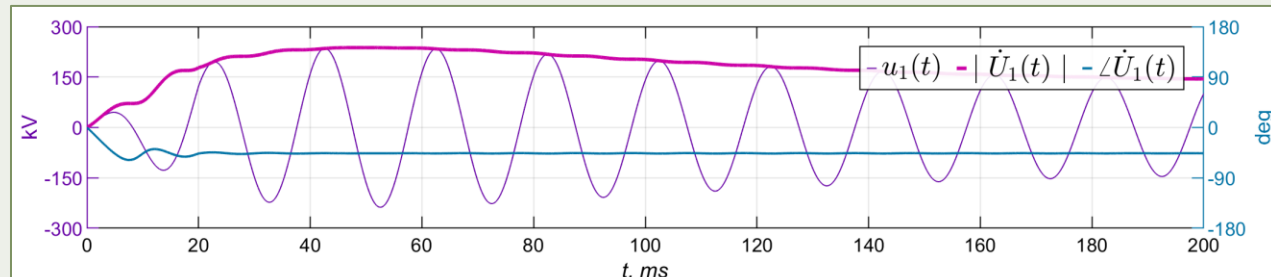
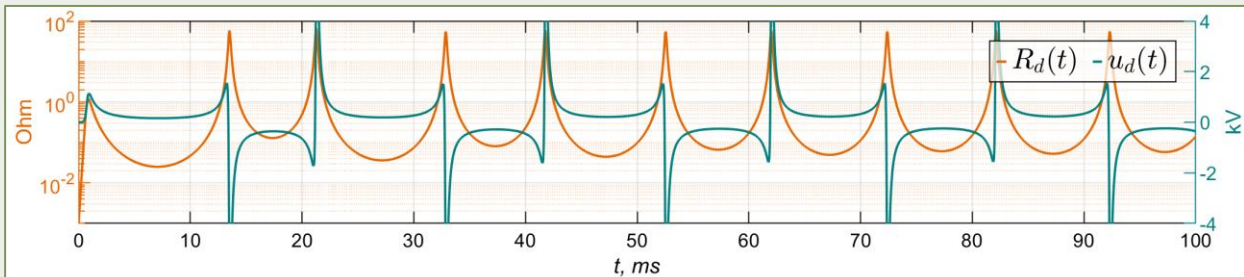




# ПРИМЕРЫ ОЦЕНКИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЕТЛИ КЗ

## Нелинейное сопротивление дуги

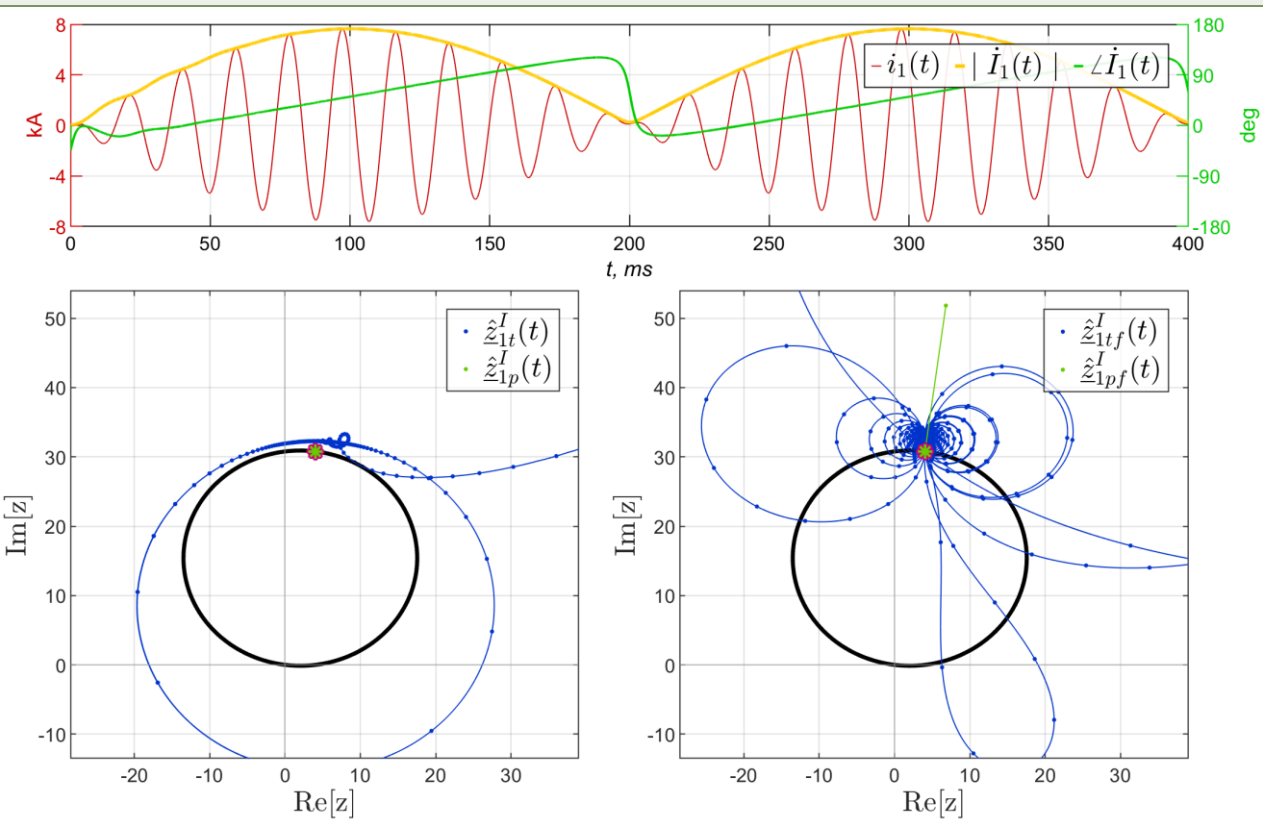
## Электромеханический процесс



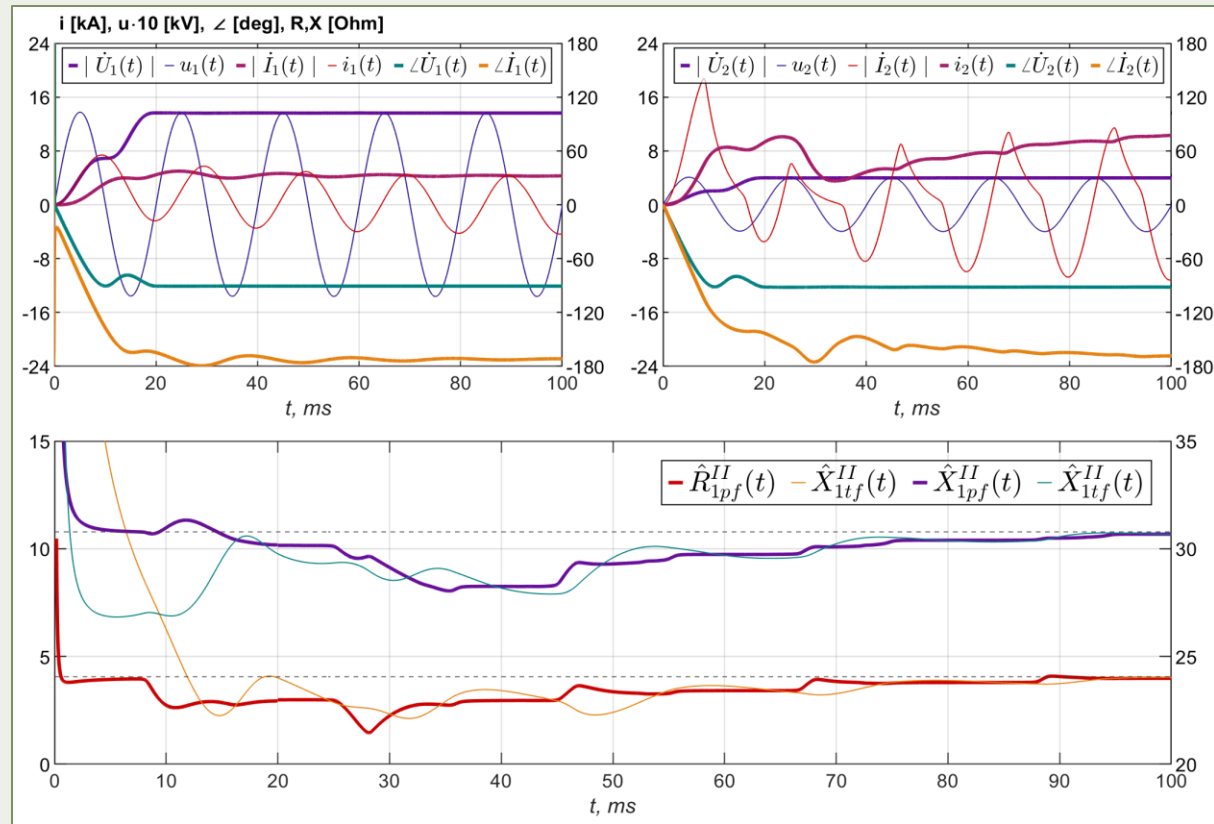


# ПРИМЕРЫ ОЦЕНКИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЕТЛИ КЗ

## Асинхронный режим



## Насыщение ТТ

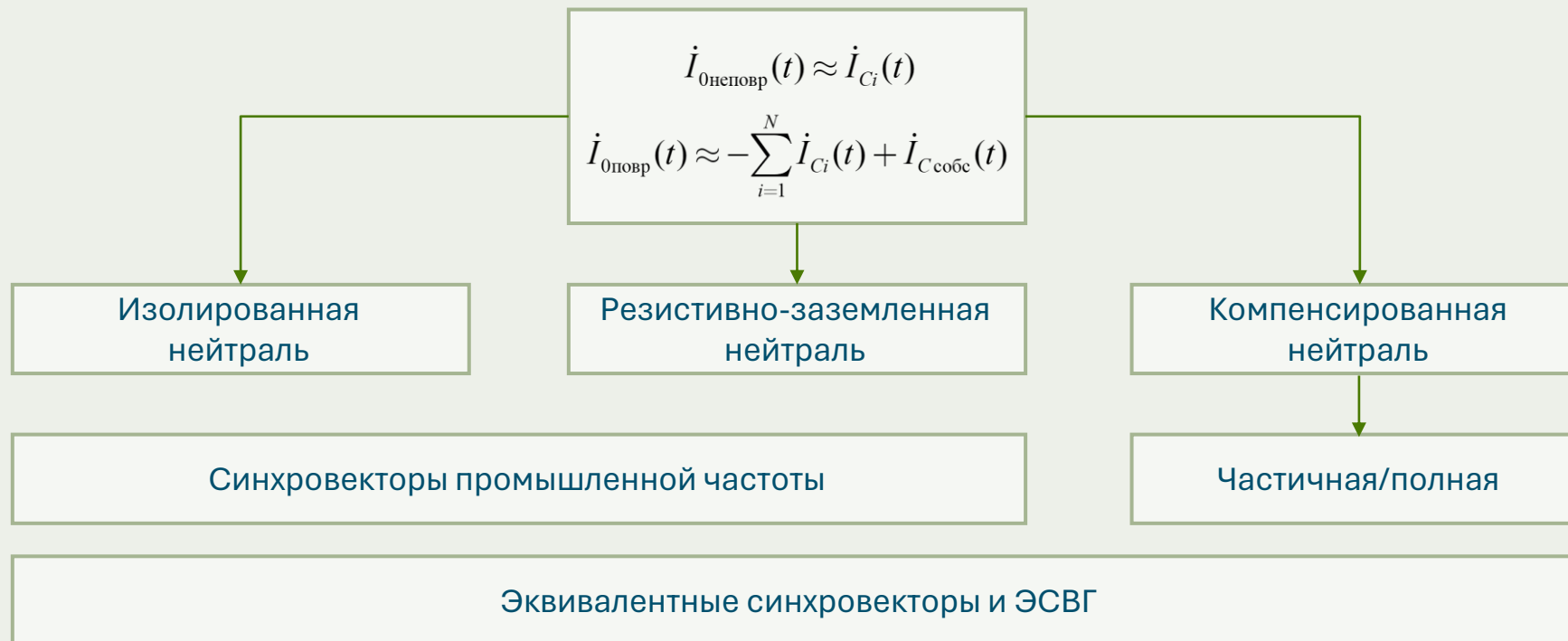




# ЗАЩИТА ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ

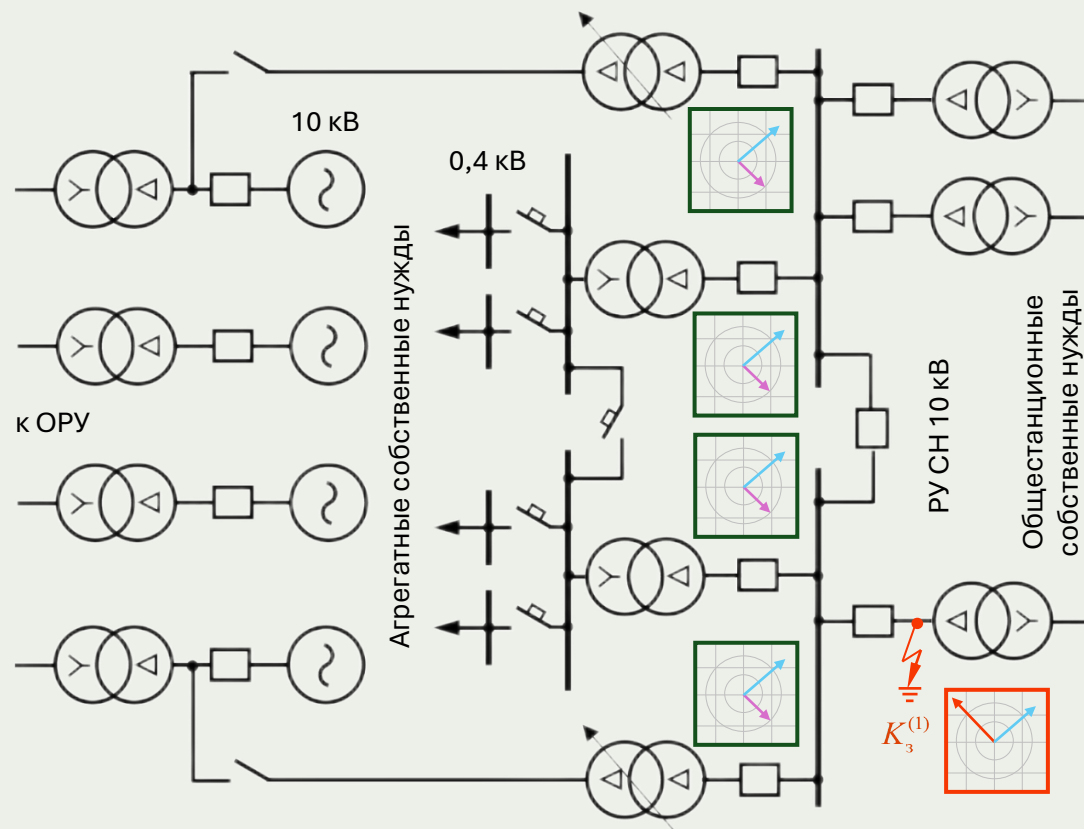
## Преимущества ЭСВГ:

- Универсальная защита для любого типа сети
- Повышение чувствительности и селективности работы
- Специализированное решение для кабельных сетей 6-10 кВ (ЭНЛЗ)
- Локальный, распределенный и централизованный принцип защиты

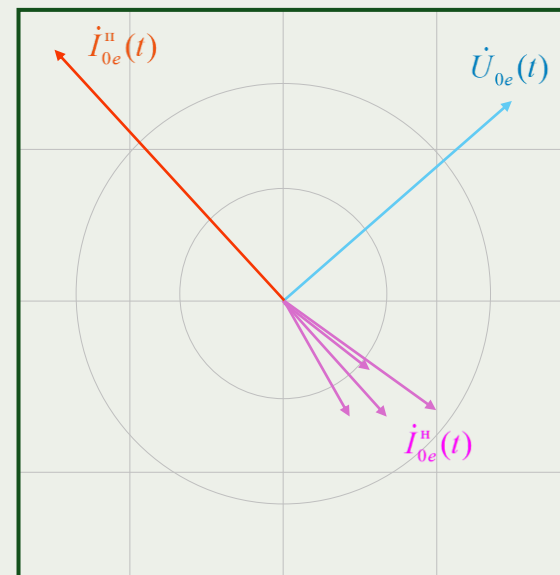




# ЗАЩИТА ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ



Эквивалентные синхровекторы ВГ



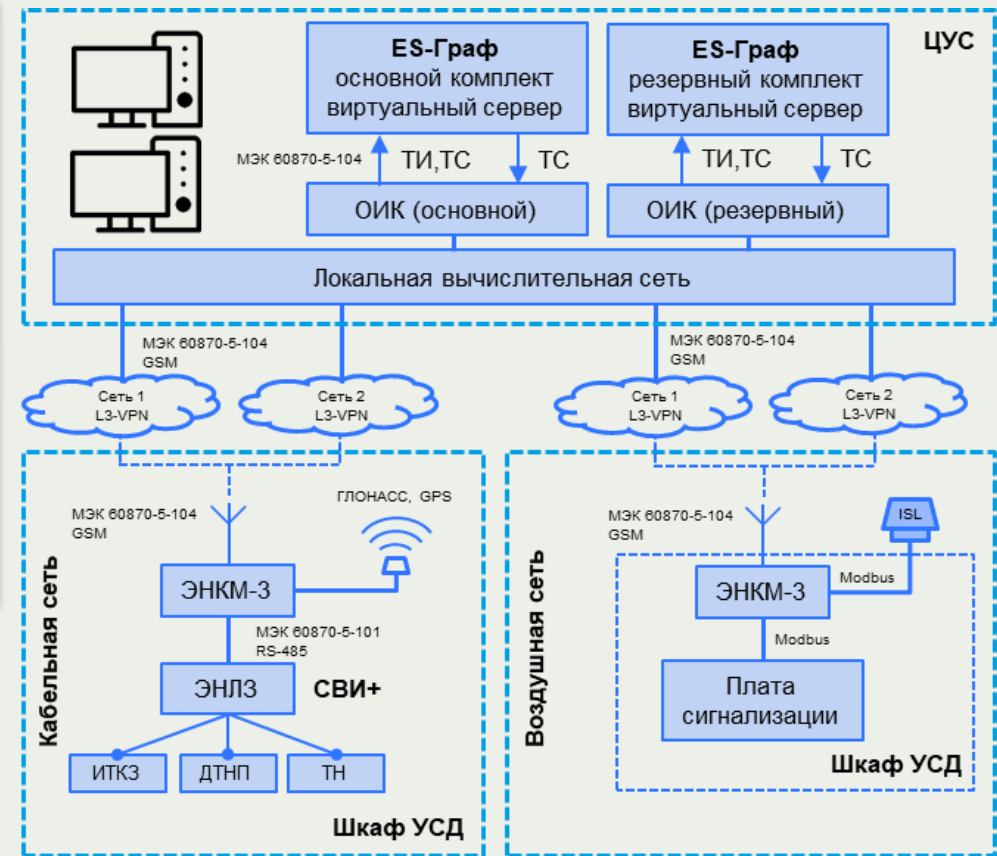
Преимущества:

1. Повышенная чувствительность
2. Независимость от состава и уровня ВГ
3. Работа в переходном режиме ОЗЗ





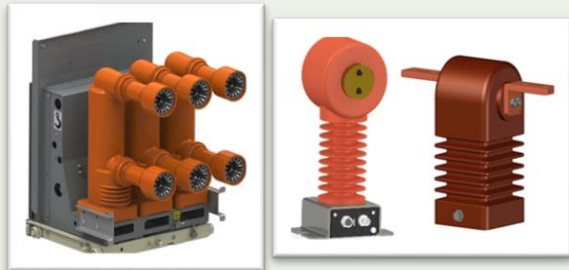
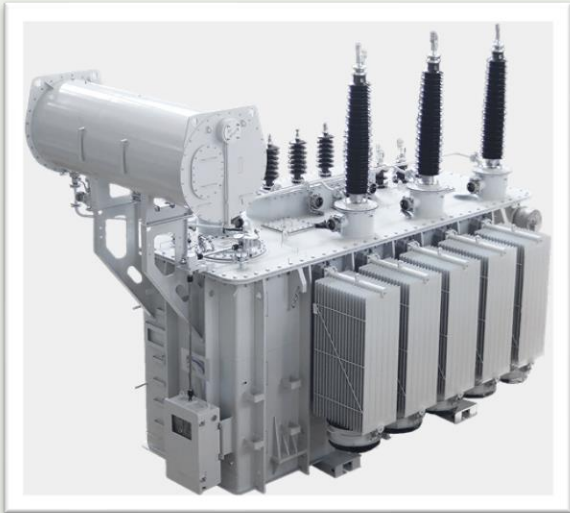
# ЗАЩИТА ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ



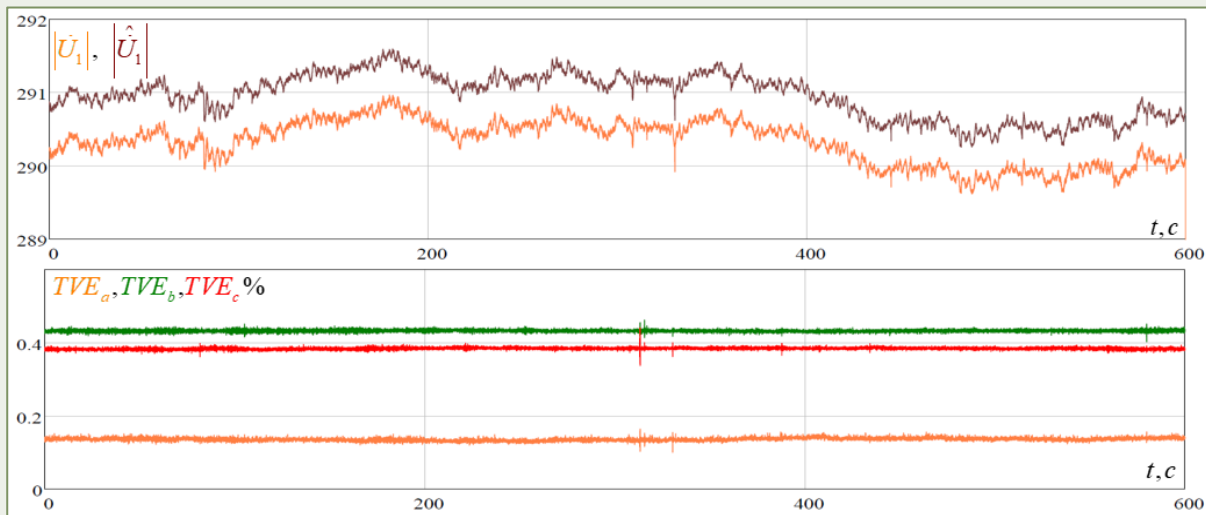


# СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА

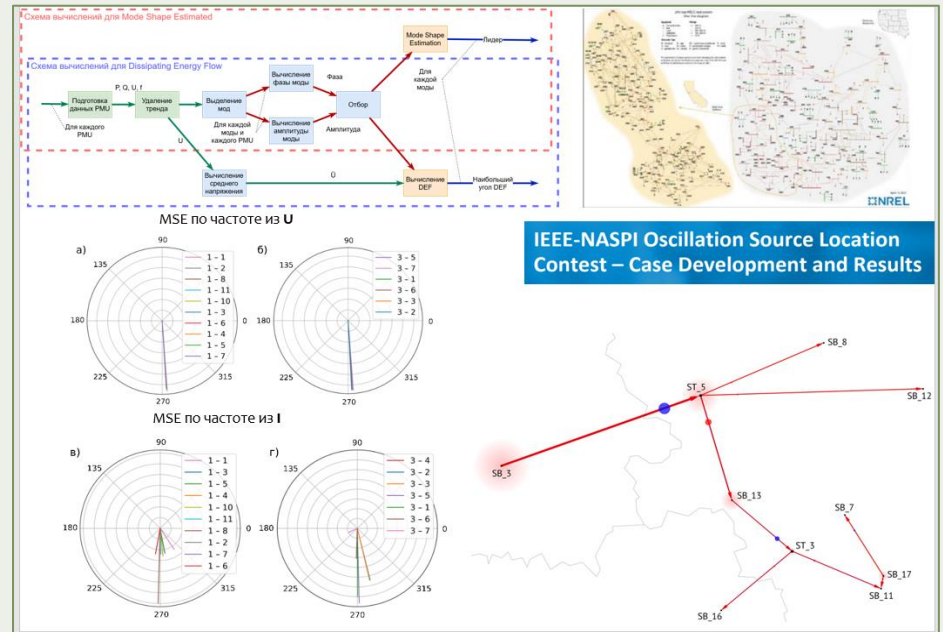
## Мониторинг электрооборудования



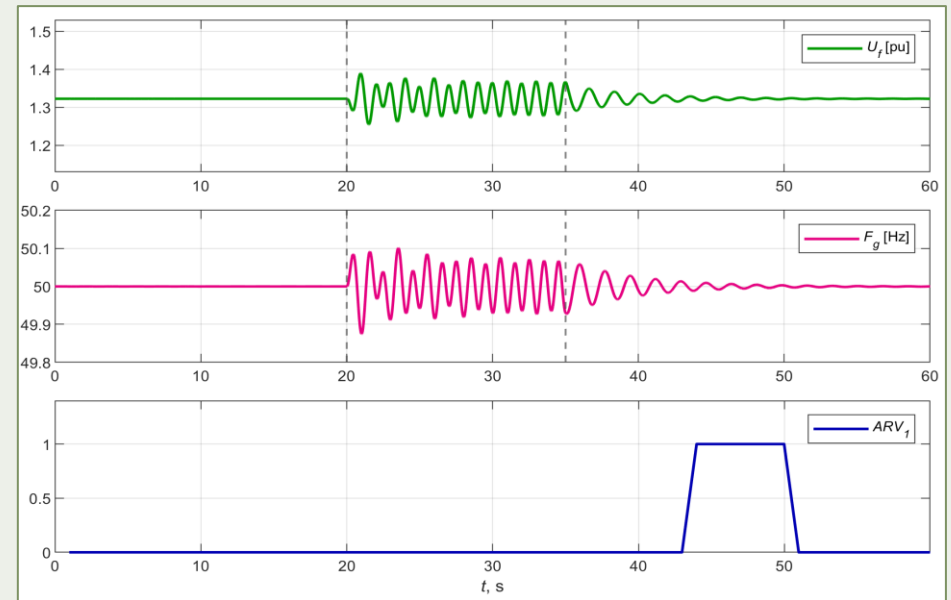
## Мониторинг состояния линии



## Мониторинг переходных режимов

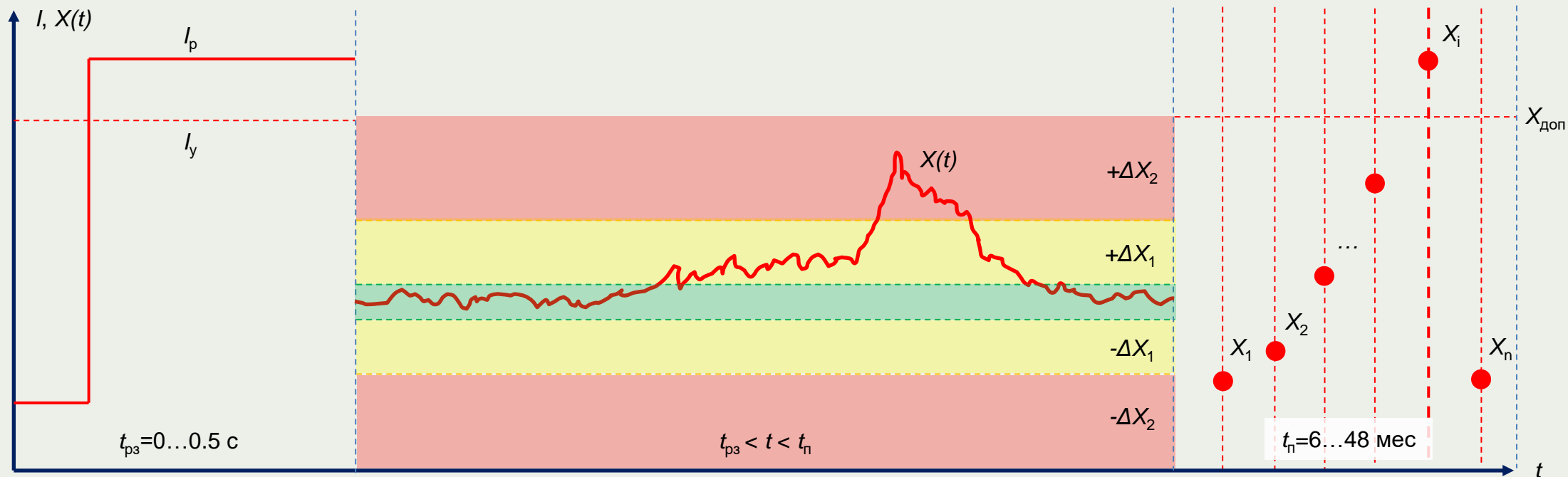


## Мониторинг систем возбуждения СГ





# ПРЕДИКТИВНЫЙ АНАЛИЗ



Релейная защита

Система мониторинга (СМСТ)

Периодический контроль



# СИСТЕМА МОНИТОРИНГА СИСТЕМНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ (СМСР)

- **СМСР** обеспечивает непрерывный контроль корректности работы автоматических регуляторов возбуждения и систем возбуждения (АРВ и СВ) синхронных генераторов.

- **СМСР** является распределённой системой, которая использует измерение синхровекторов напряжения и тока генератора для контроля параметров его работы и предупреждения развития НЧК.

## Критерии контроля корректности:

- Участие АРВ в демпфировании колебаний
- Наличие ввода релейной форсировки
- Корректное завершение релейной форсировки
- Блокировка каналов системной стабилизации (системного стабилизатора) при изменении частоты
- Корректность работы ограничителя минимального возбуждения
- Корректность работы ограничителя тока ротора/тока возбуждения возбуждителя
- Корректность работы ограничителя напряжения возбуждения

## Контролируемые параметры:

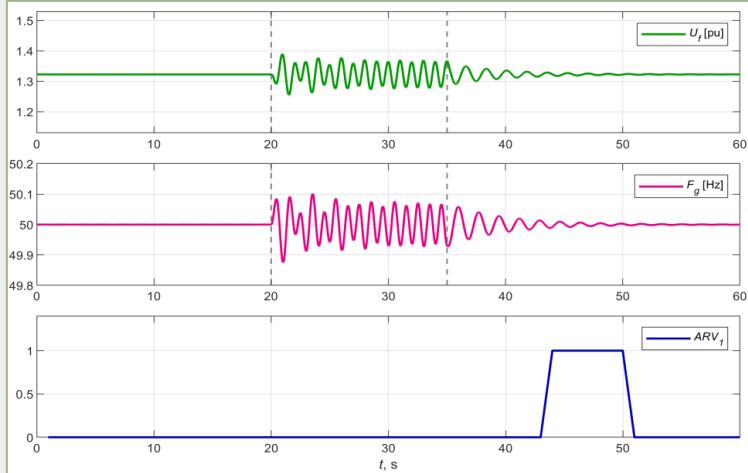
- напряжение статора генератора  $U_g$
- активная мощность генератора  $P_g$
- реактивная мощность генератора  $Q_g$
- частота напряжения статора генератора  $F_g$
- напряжение возбуждения генератора  $U_f$
- ток возбуждения генератора/возбуждения возбуждителя  $I_f$



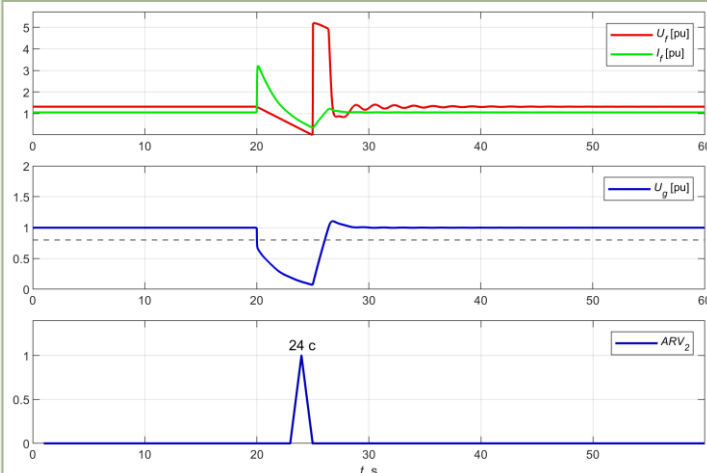


# СИСТЕМА МОНИТОРИНГА СИСТЕМНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ (СМСР)

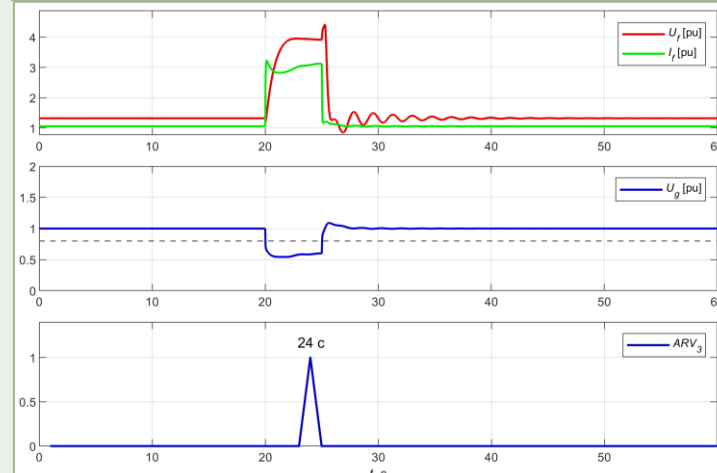
### АРВ – источник колебаний



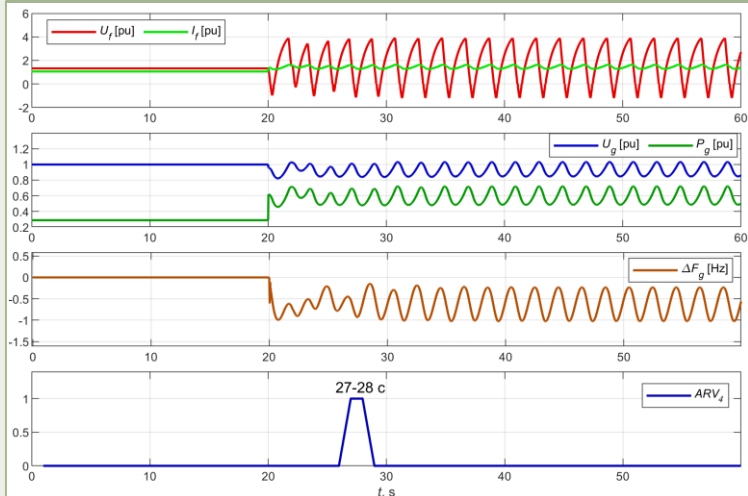
### Отсутствие ввода релейной форсировки



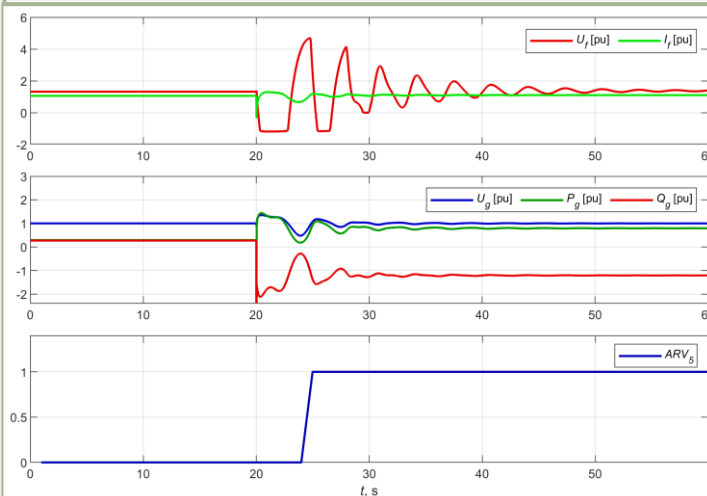
### Преждевременное завершение релейной форсировки



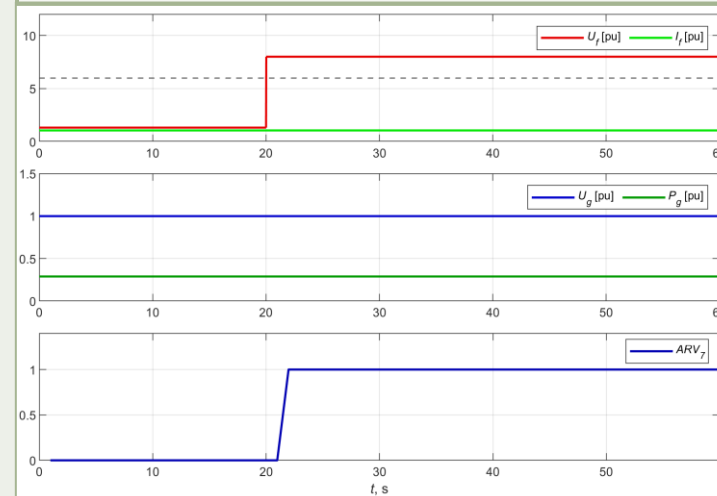
### Отсутствие блокировки каналов системной стабилизации



### Некорректная работа ограничителя минимального возбуждения



### Некорректная работа ограничителя напряжения возбуждения



# МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

## Основные измерения:

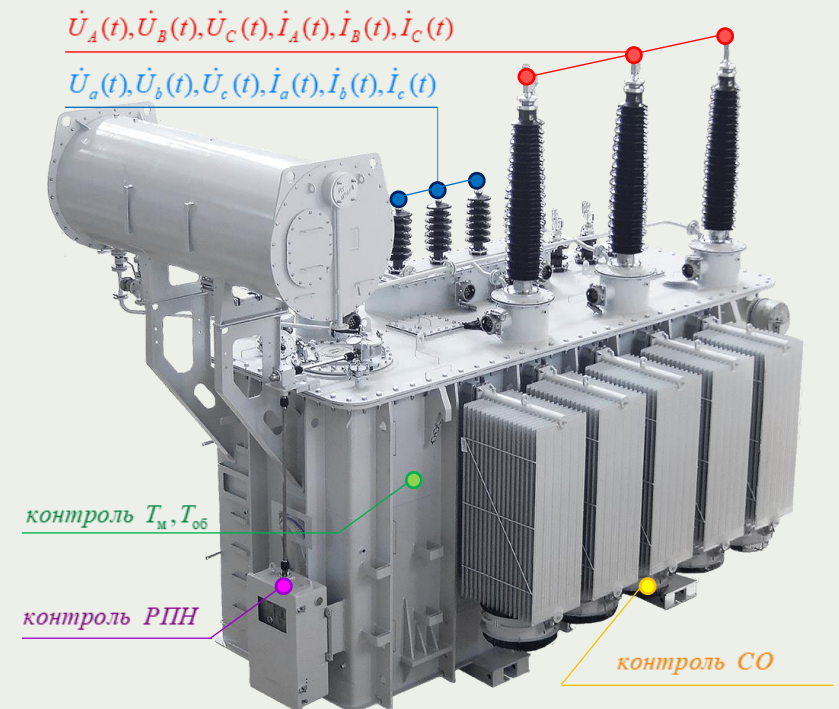
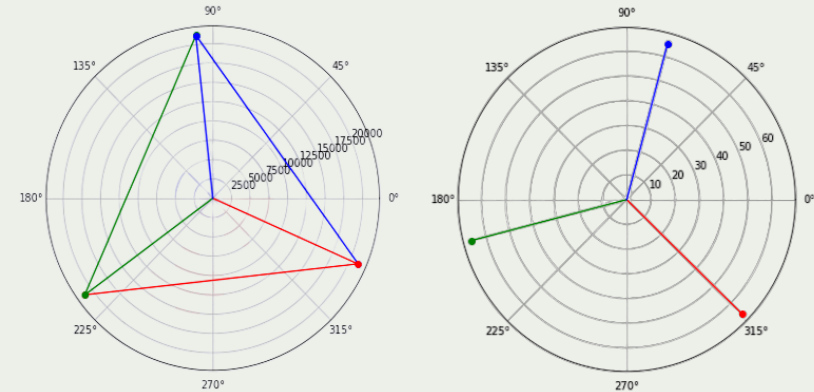
- синхронизированные векторы (синхровекторы) фазных токов и напряжений трансформатора всех обмоток, частота сети
- фазные активные и реактивные мощности обмоток
- параметры качества электроэнергии

## Дополнительные измерения:

- положение ступени РПН
- температурные датчики (температура масла, обмоток)
- состояние электродвигателей системы охлаждения (СО)

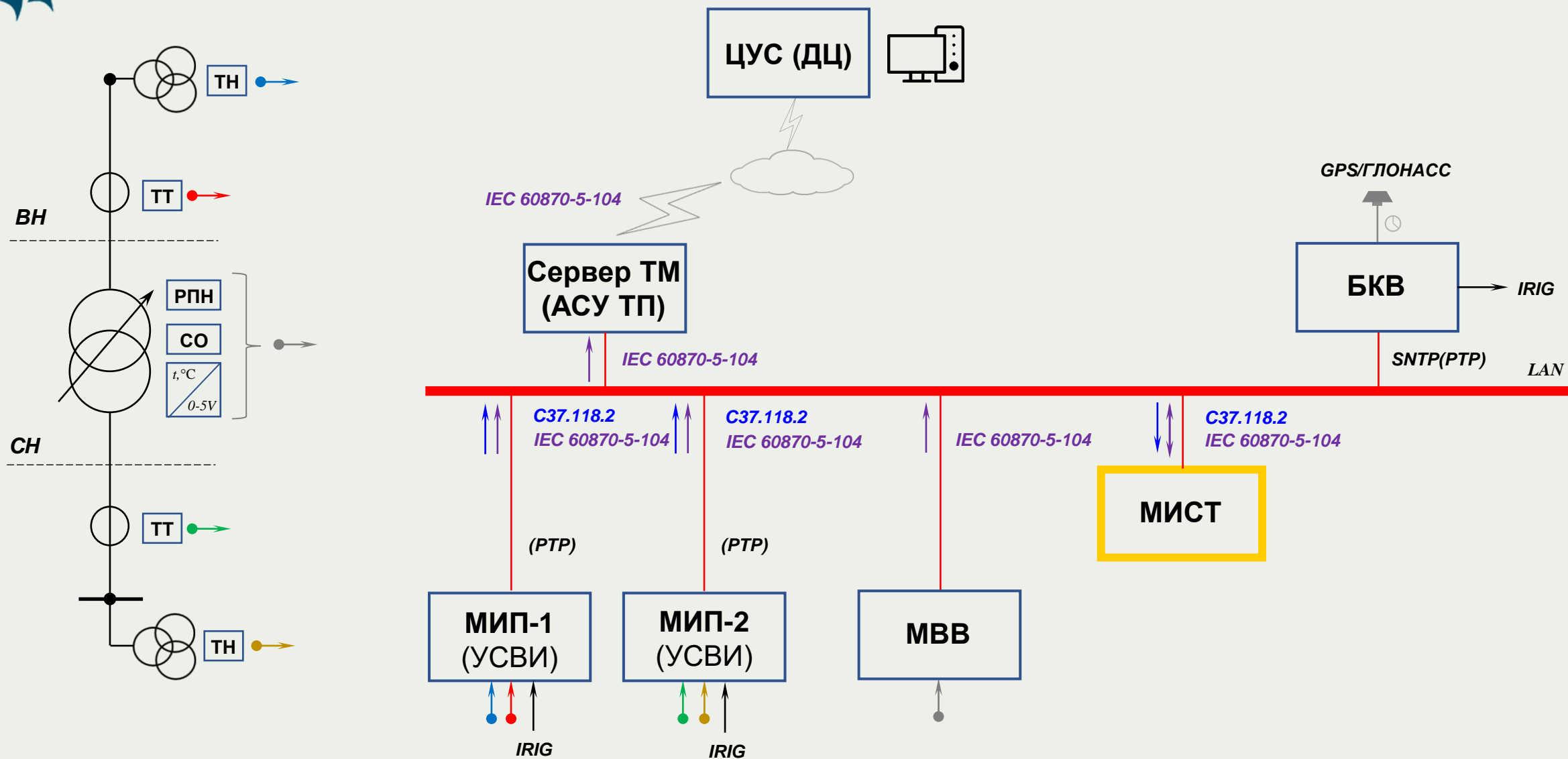
## Оцениваемые диагностические параметры:

- фазные потери активной и реактивной мощности
- импедансы продольной и поперечной ветвей схемы замещения
- потери холостого хода и короткого замыкания
- напряжение короткого замыкания и ток холостого хода
- фактический коэффициент трансформации по фазам
- параметры для прямой последовательности (обратной, нулевой)
- оценка перегрузочной способности и износа витковой изоляции
- оценка состояния цепей ИТТ и ИТН





# МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ





# МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

**МИСТ**  
мониторинг состояния трансформатора

**T-1**  
10 MVA

35.6 kV 398 kVA  
+4  
+76 °C

10:36:54  
13.09.23

5.99 kV 331 kVA

ESC < > OK

**T-1**  
10 MVA

36.1 kV 5.42 MVA  
+4  
+76 °C

6.1 kV 4.85 MVA

10:36:54  
13.09.23

**T-1 Parameters**

Sn	10 MVA	Kt	5.806
Uv	38.5 kV	Z12	11.2 Ohm
Un	6.6 kV	Z0	4.6e3 Ohm
Uk	8.2 %	LTC	±6x1.5%
Ix	3.3 %	S/G	Y0/D-11
Pk	29.6 kW		
Px	91.5 kW		

10:36:54  
13.09.23

**T-1 35 kV**

Ua,kV	22,21	Ia,A	86,72
∠Ua,°	60,83	∠Ia,°	30,15
Ub,kV	21,86	Ib,A	90,24
∠Ub,°	-61,53	∠Ib,°	-92,37
Uc,kV	22,15	Ic,A	85,12
∠Uc,°	179,12	∠Ic,°	150,12

10:36:54  
13.09.23

**T-1 6 kV**

Ua,kV	3,52	Ia,A	459,28
∠Ua,°	90,21	∠Ia,°	60,18
Ub,kV	3,48	Ib,A	461,93
∠Ub,°	-30,15	∠Ib,°	-61,92
Uc,kV	3,54	Ic,A	457,23
∠Uc,°	-150,15	∠Ic,°	-179,28

10:36:54  
13.09.23

**T-1 Sd**

Sd: -30% 0% 30%  
+8%

10:36:54  
13.09.23

**T-1 Kt**

Kt: -1% 0% 1%  
+0.3%

10:36:54  
13.09.23

**T-1 Z12**

Z12: -15% 0% 15%  
+4.5%

10:36:54  
13.09.23

**T-1 Z0**

Z0: -30% 0% 30%  
+6.5%

10:36:54  
13.09.23

**T-1 Ix**

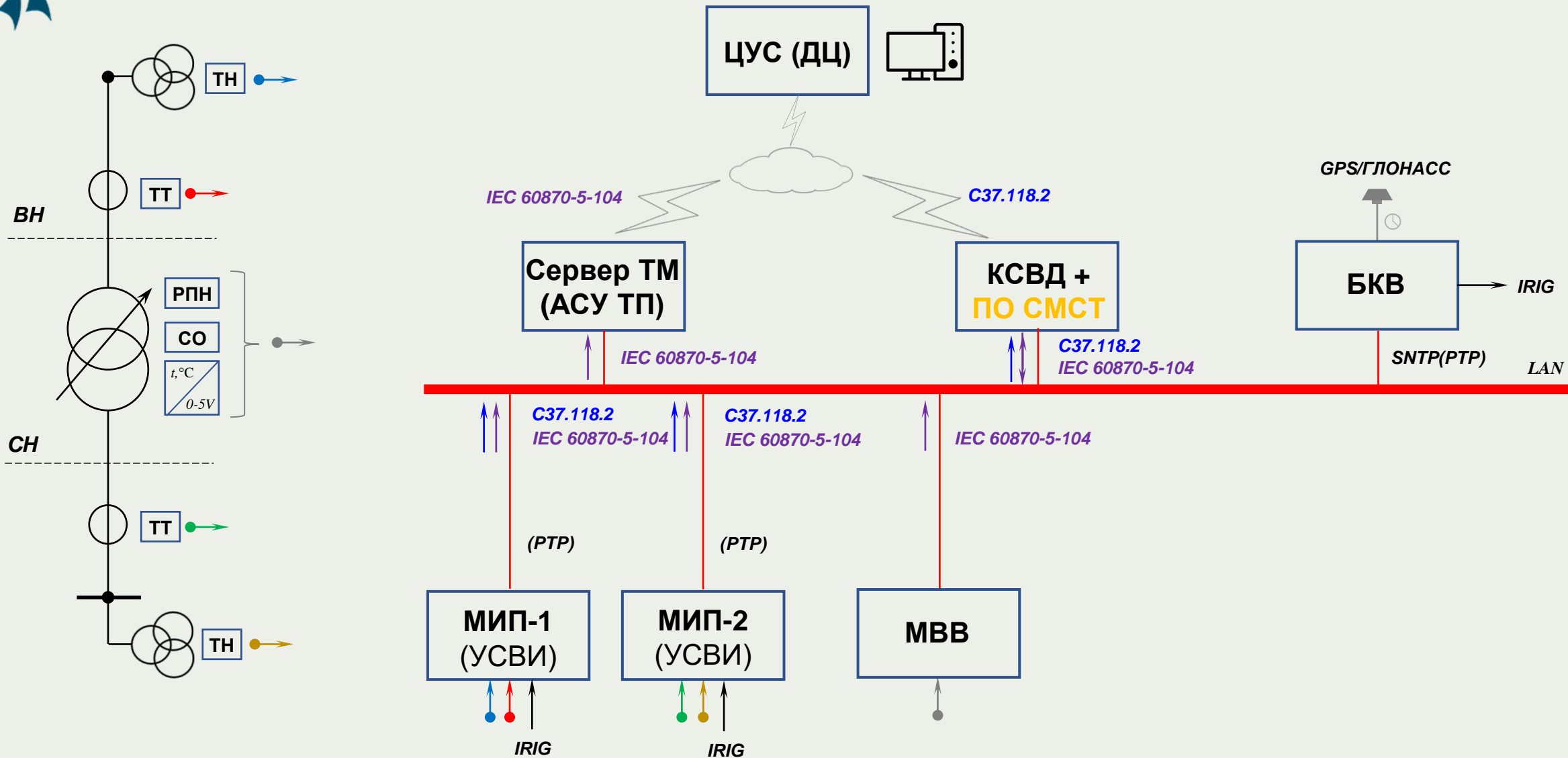
Ix: -30% 0% 30%  
27.6%

10:36:54  
13.09.23





# МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ



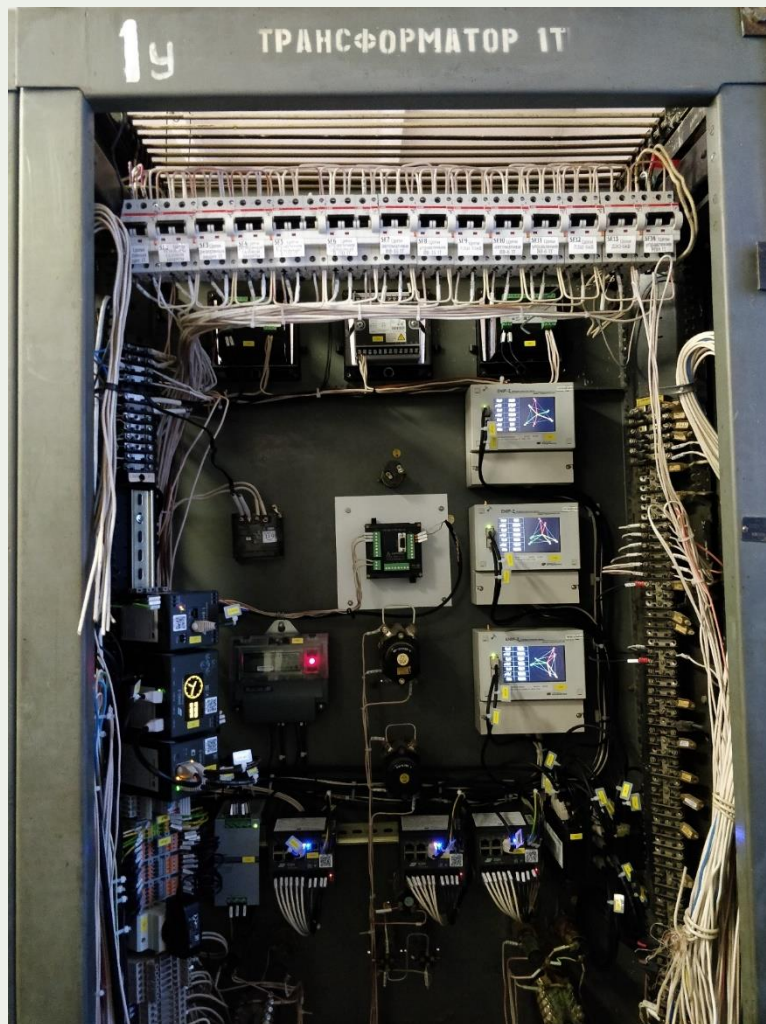


# МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

ПС № 8 (Архангельск)



ПС № 7 (Архангельск)

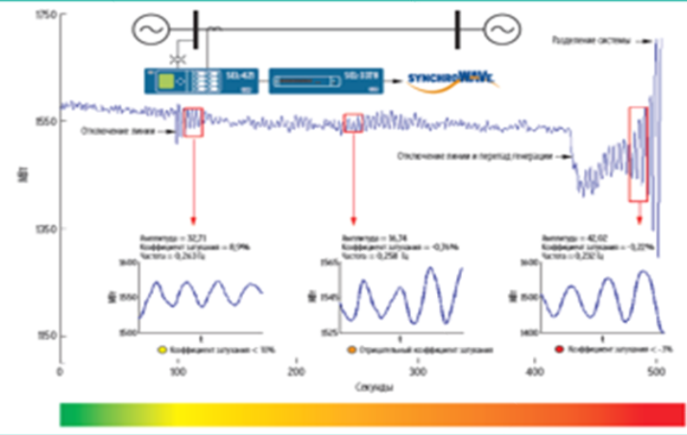




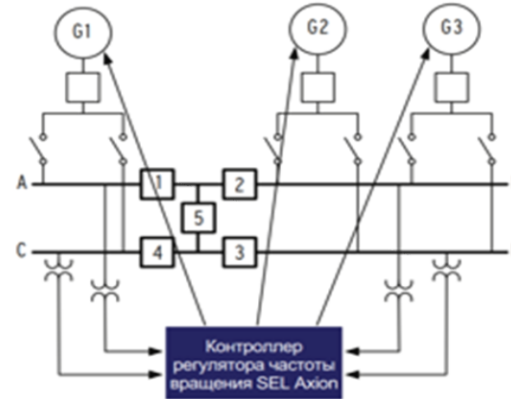
# АВТОМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ

## Сети с распределенной генерацией и ВИЭ

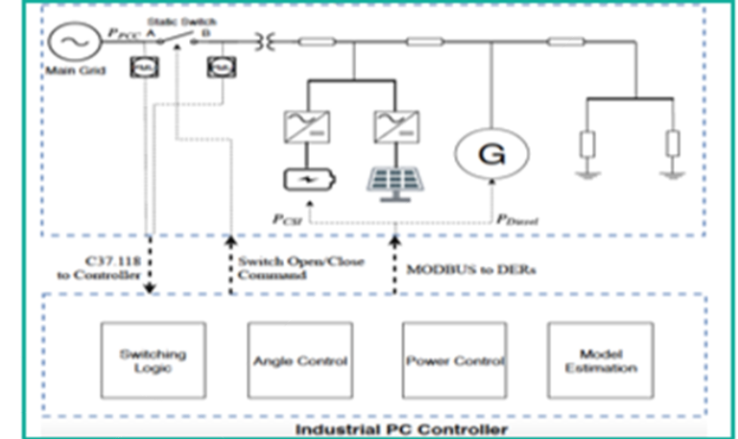
### мониторинг переходных режимов



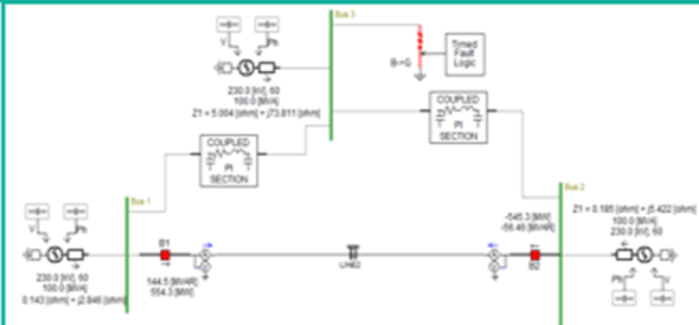
### синхронизация энергорайонов



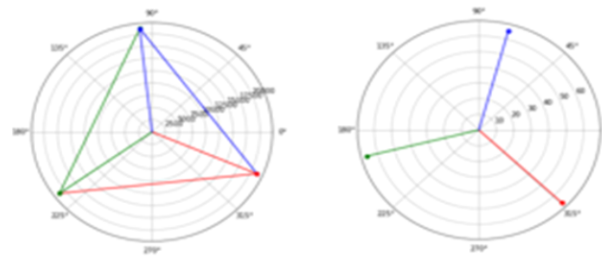
### работа режимной автоматики



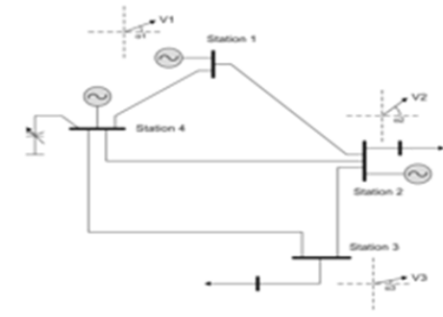
### идентификация параметров модели



### измерение параметров сети



### контроль устойчивости режима

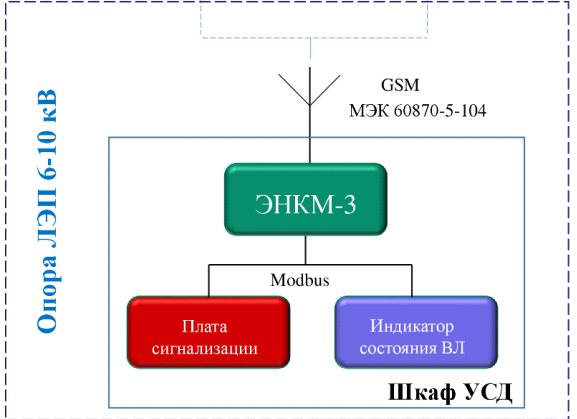
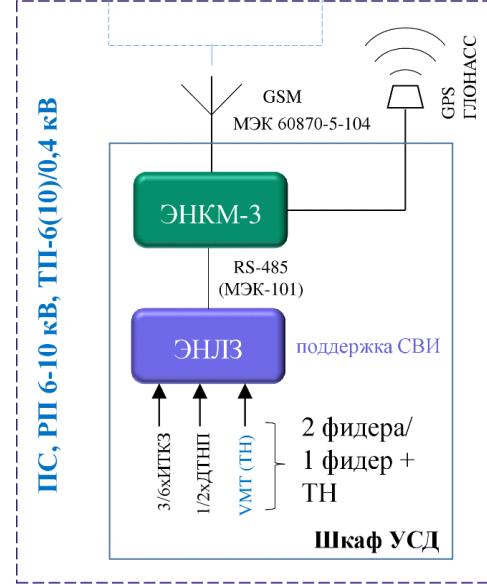
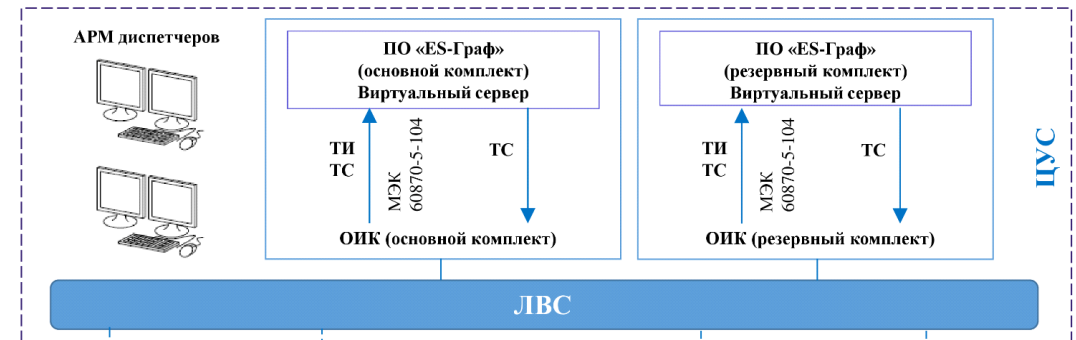
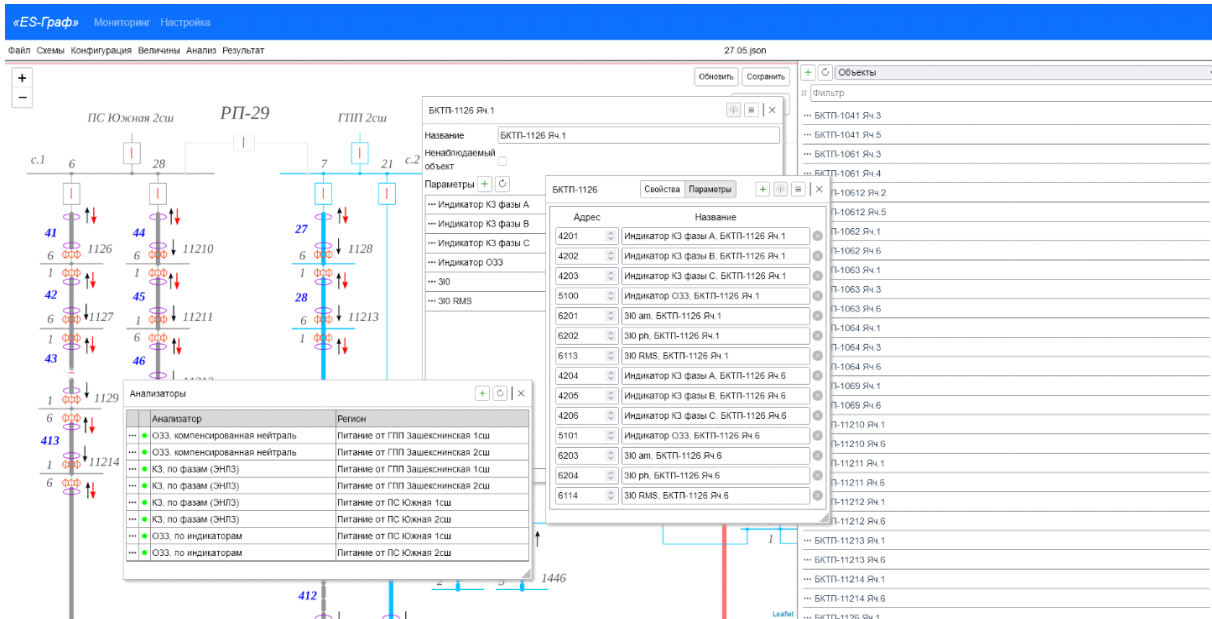
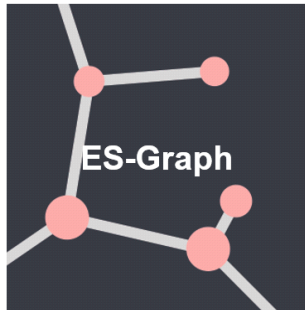






# АВТОМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ

## Система автоматического восстановления электроснабжения потребителей (САВС)

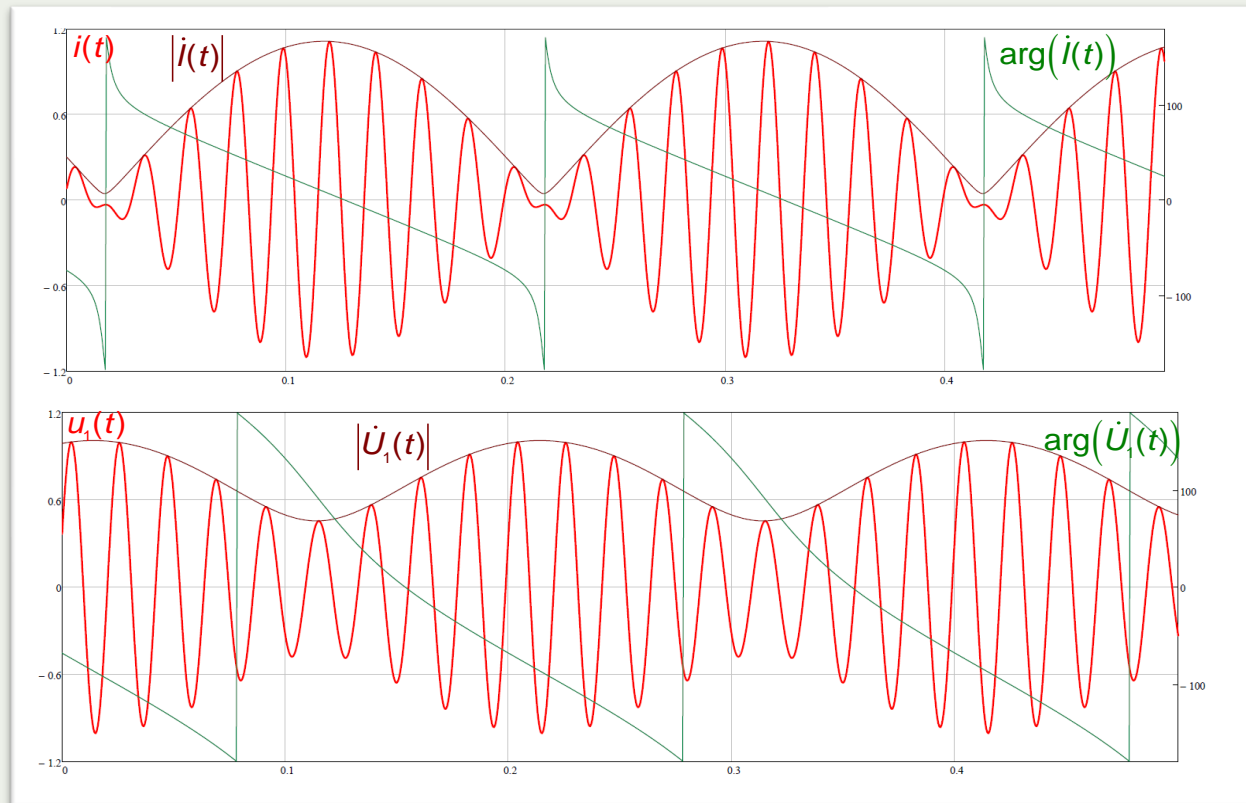


**Условные сокращения:**  
ТИ – телеизмерения; ТС – телесигнализация; УСД – устройство сбора данных; ЛВС – локальная вычислительная сеть; АРМ – автоматизированное рабочее место; ОИК – оперативно-информационный комплекс; ИТКЗ – индикатор тока КЗ; ДТНП – датчик тока нулевой последовательности; ЦУС – центр управления сетью

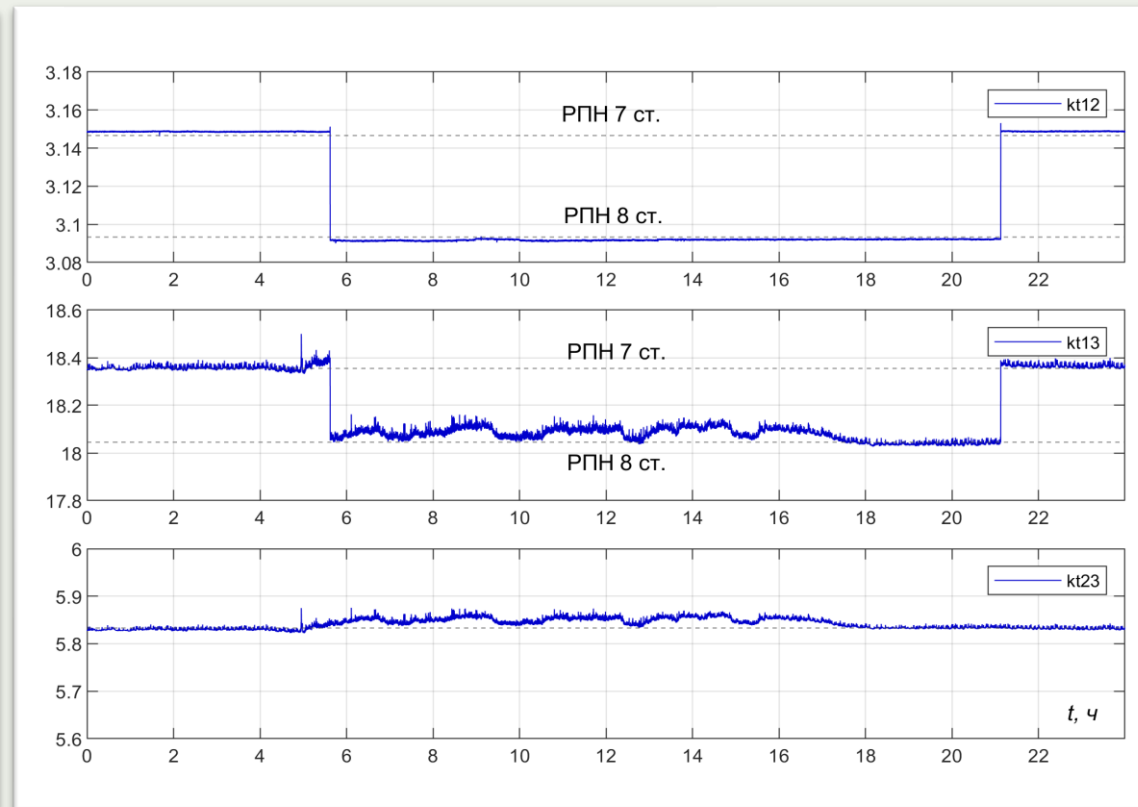




## Ликвидация асинхронного режима (АЛАР)



## Автоматическое регулирование КТ





## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Технология СВИ имеет значительные преимущества для автоматизации электростанций и электрических сетей, в т.ч. на объектах гидроэнергетики
- СВИ обеспечивает построение различных уровней систем релейной защиты и автоматики (локальные, централизованные, распределенные)
- Двух- и многосторонние измерения синхровекторов тока и напряжения позволяют реализовать эффективные системы защиты, автоматики, мониторинга и управления
- Развитие теории СВИ открывает новые возможности для анализа переходных режимов работы энергосистемы и построения новых алгоритмов работы защиты
- Одними из наиболее перспективных направления применения СВИ в релейной защите являются защиты на дифференциальном и дистанционном принципе, а также защиты от ОЗЗ
- Значительный интерес представляет применение СВИ в автоматике сетей с РГ и ВИЭ
- СВИ широко применяется в системах мониторинга электрических сетей (СМПР), а также имеет перспективы применения в системах мониторинга оборудования (СМСР, СМСТ)



инженерный центр  
**энергосервис**



# БЛАГОДАРИМ ЗА ВНИМАНИЕ!

Пискунов С.А., [s.piskunov@ens.ru](mailto:s.piskunov@ens.ru)



Каталог

