



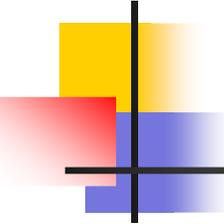
Системотехника защиты и автоматки
линий электропередачи с использованием
пространственно-временной обработки
токов и напряжений

ПОДШИВАЛИН
Андрей Николаевич

АО «ВНИИР»

ООО «Релематика»

ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

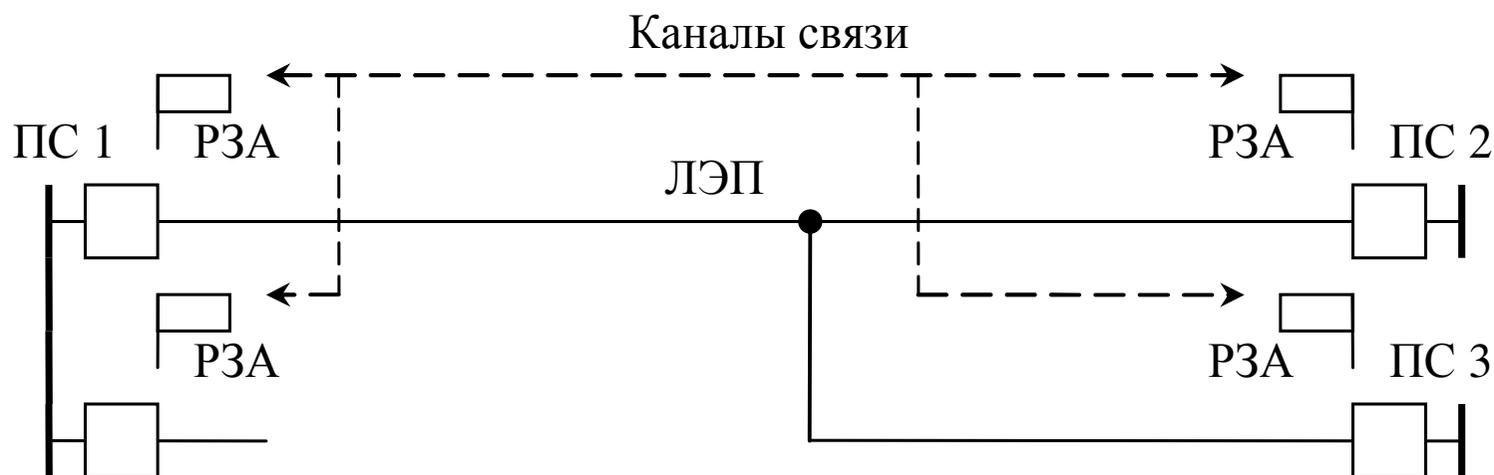


Задачи РЗА ЛЭП

- Задачи РЗА
 - Выявление повреждения и отключение поврежденного элемента
 - Реагирование на аномальные режимы: выявление асинхронного режима
- Задачи совершенствования РЗА
 - Адаптация к новым условиям функционирования сети, производства и потребления электроэнергии
 - Повышение быстродействия
 - Повышение чувствительности
- Пути совершенствования
 - Повышение информированности устройств РЗА
 - Развитие обработки информации

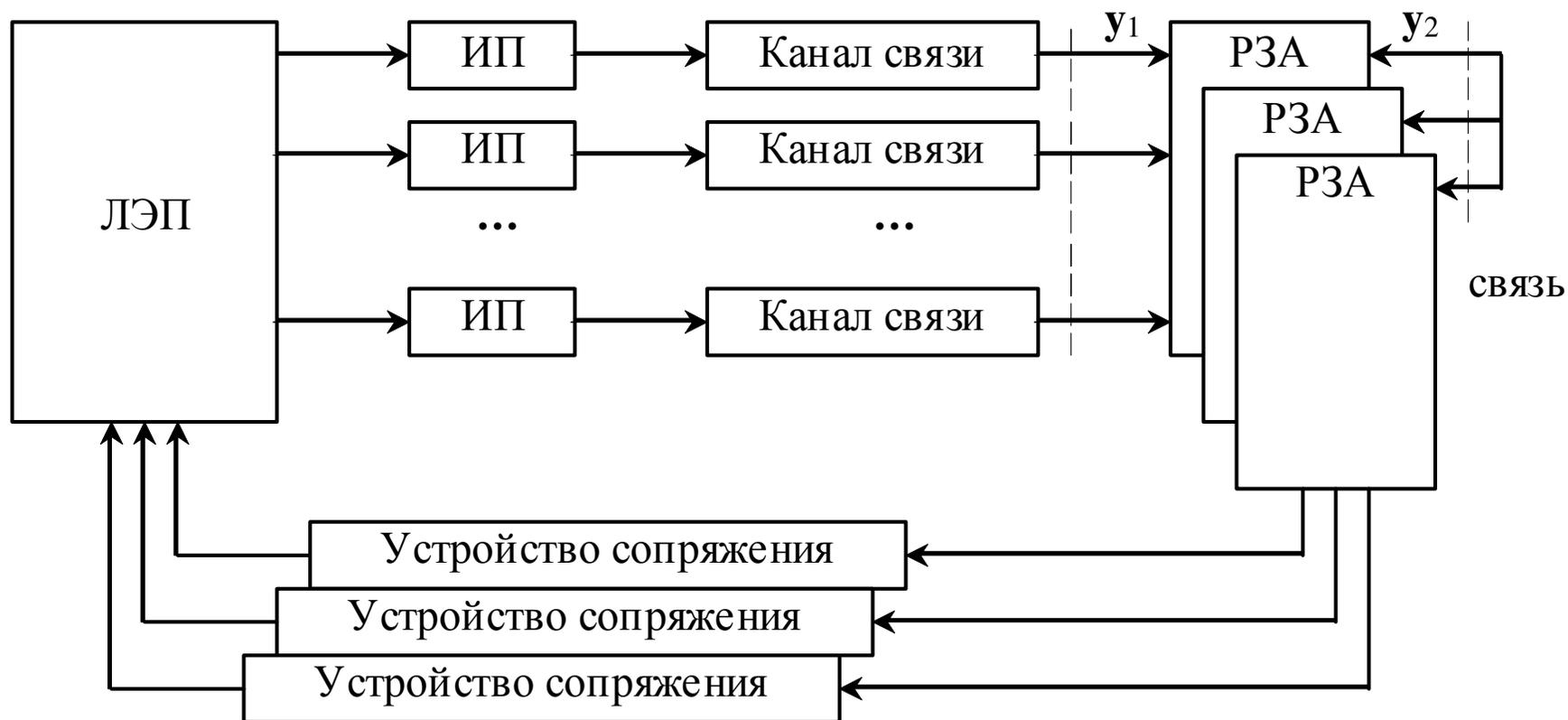
Особенности электротехнического комплекса ЛЭП

- Переходные процессы в ЛЭП
 - Электромеханические
 - Электромагнитные
 - Волновые
- Подходы к РЗА
 - Параметры аварийного режима
 - РЗА по переходным процессам
 - Высокочастотные методы: активные и пассивные

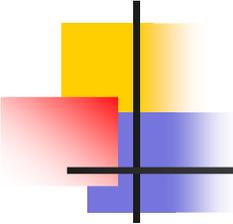


ПС – подстанция
РЗА – релейная защита и автоматика
ЛЭП – линия электропередачи

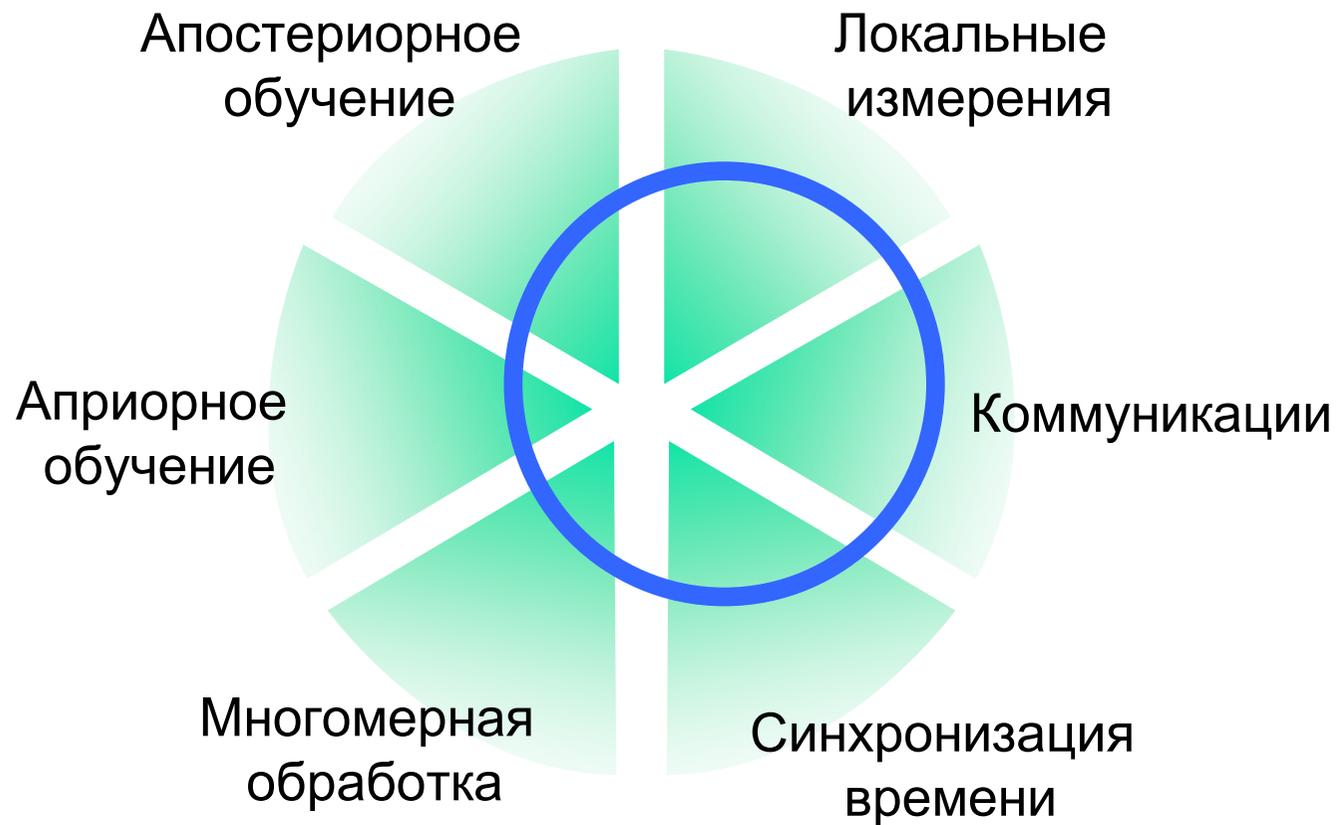
Функциональная схема комплекса ЛЭП



ИП – измерительный преобразователь
РЗА – релейная защита и автоматика
ЛЭП – линия электропередачи



Задачи разработки РЗА ЛЭП



Задачи распознавания в РЗА ЛЭП

■ Задачи

- Ситуационная
- Диагностическая

■ Распознаваемость

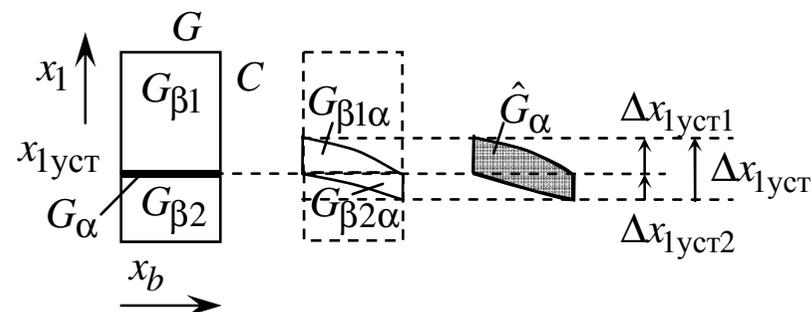
- Условие нераспознаваемости

$$\min_{x_{\beta} \in G_{\beta}} \text{dist}(y(x_{\alpha}), y(x_{\beta})) < \varepsilon$$

- Обратное преобразование замера

$$\Phi^{-1}(z) = \hat{x} = \arg(\min_{x' \in G'_{\alpha}} \text{dist}(z, \Phi(x'))) < \varepsilon$$

$\Phi(x')$ – прямое преобразование в РЗА

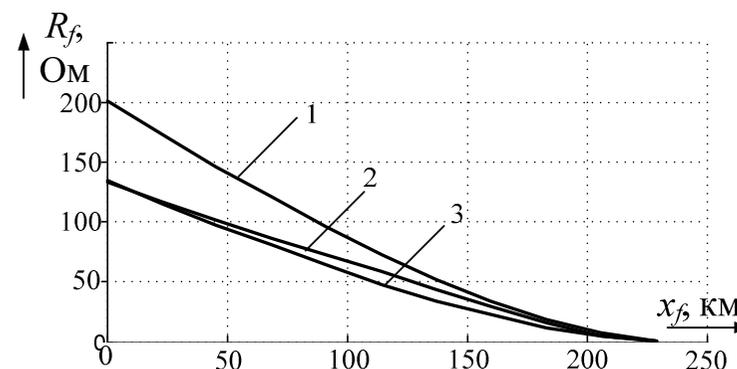


α – отслеживаемые режимы

β – альтернативные режимы

$x \in C$ – объектные параметры

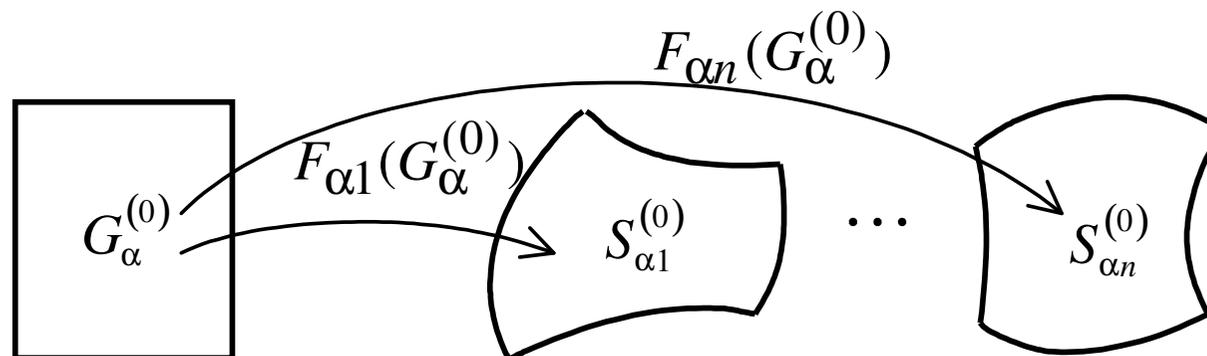
$y \in B$ – измеренные сигналы



1 – трёхфазное КЗ, 2 – однофазное КЗ, 3 – междуфазное КЗ

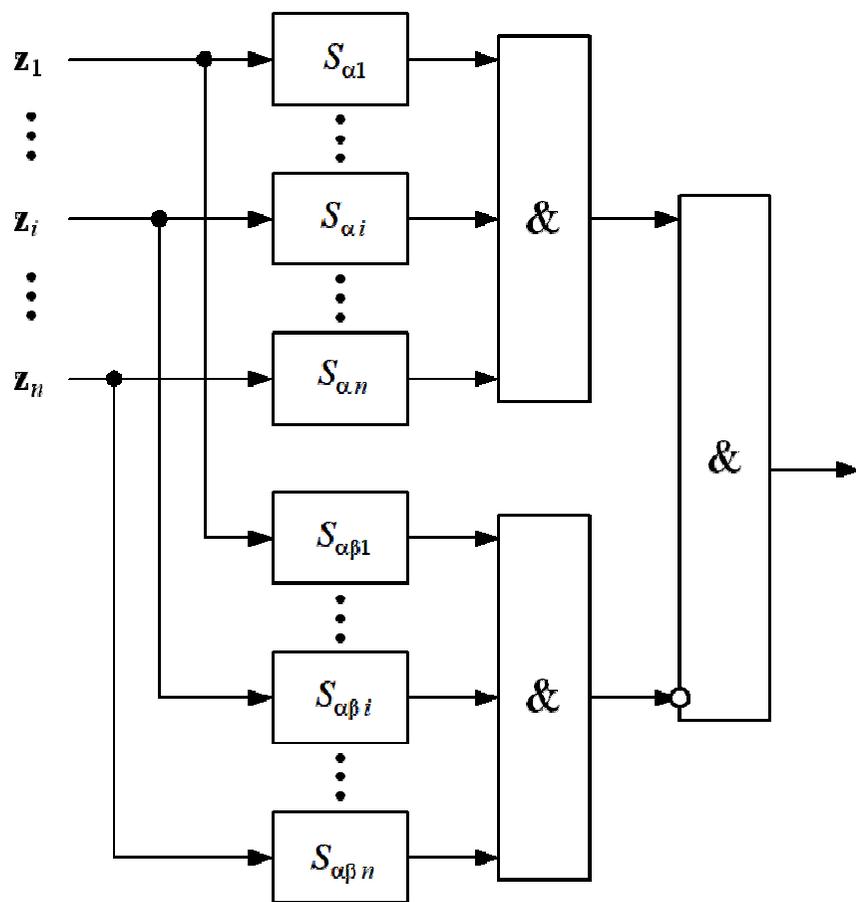
Синтез распознающих систем

- Интеллектуализация РЗА
 - повышение эффективности использования информации
 - развитие теории уставок, алгоритмические модели, обучение
 - способность РЗА оптимально работать с информационной базой любого доступного ей объема
 - исследование распознаваемости, распознающей способности
 - расширение информационной базы РЗА
 - сбор и передача информации, диагностика измерений

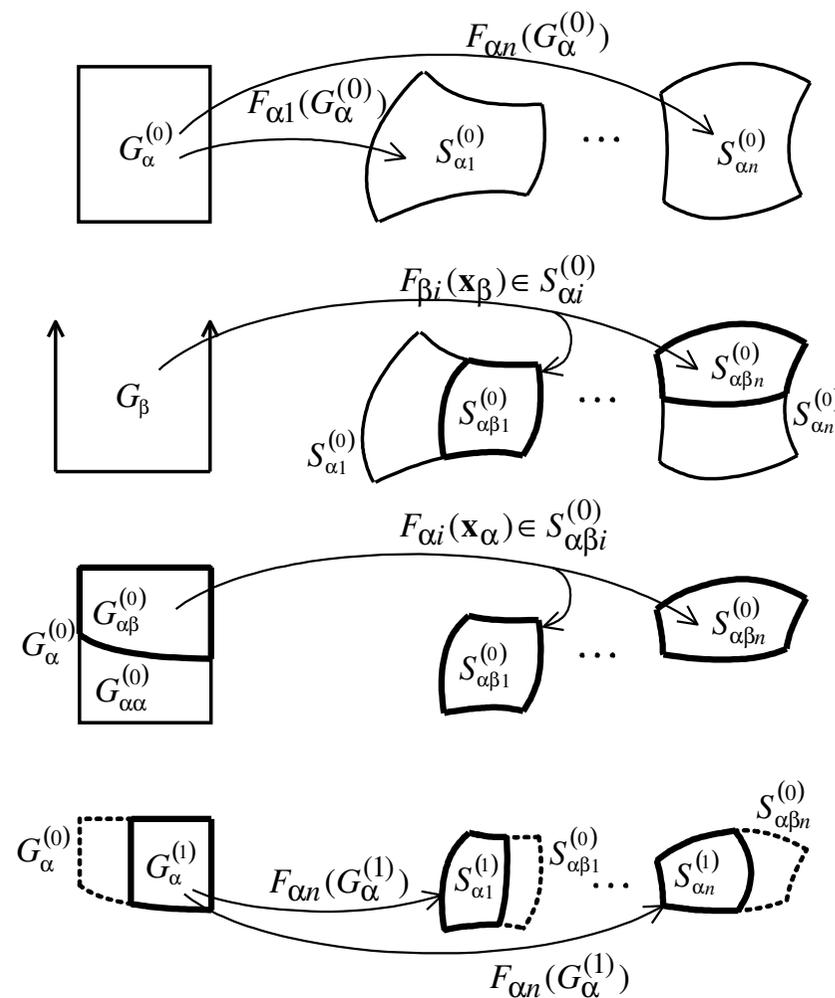


Обучение распознающих систем

Условие срабатывания



Процесс обучения



Обучение систем защиты и автоматики

- Выявление граничных режимов

$$\frac{\partial z_2(\mathbf{x})}{\partial x_j} = \frac{\partial z_2(\mathbf{x})}{\partial z_1(\mathbf{x})} \frac{\partial z_1(\mathbf{x})}{\partial x_k} \quad \begin{matrix} j = \overline{1, m} \\ k = \overline{1, m} \\ k \neq j \end{matrix}$$

- Оптимизация значений уставок по критерию охвата объектной области

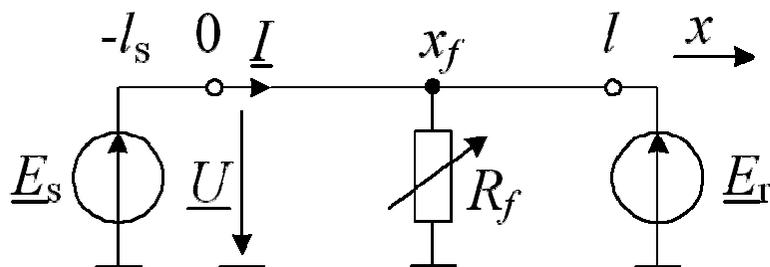
$$\mathbf{M}_{\text{опт}} = \arg \max_{\mathbf{M}} V(\mathbf{M})$$

$$V(\mathbf{M}) = V_S(S(\mathbf{M}) \cap S_{\alpha\alpha})$$



Обучение дистанционной защиты ЛЭП

- Модель электропередачи



- Объектный вектор

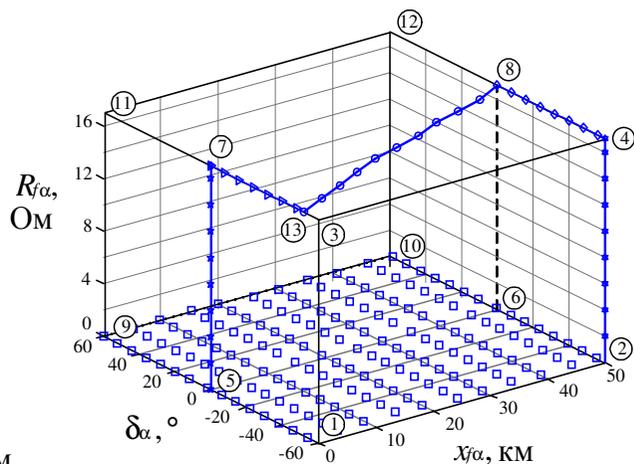
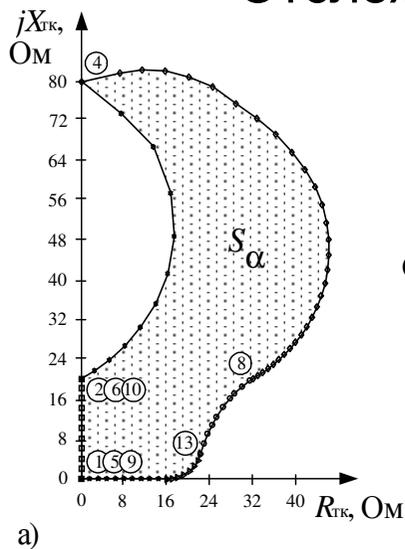
- Координата места повреждения x_f
- Переходное сопротивление R_f
- Угол передачи $\delta = \arg(\underline{E}_s / \underline{E}_r)$

- Уставочный вектор

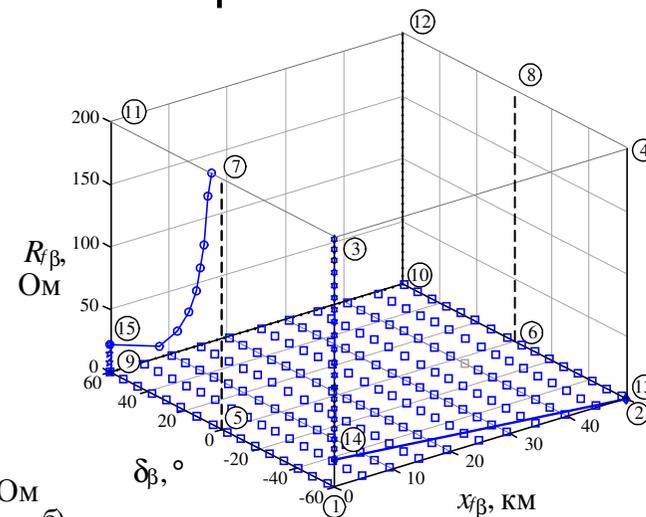
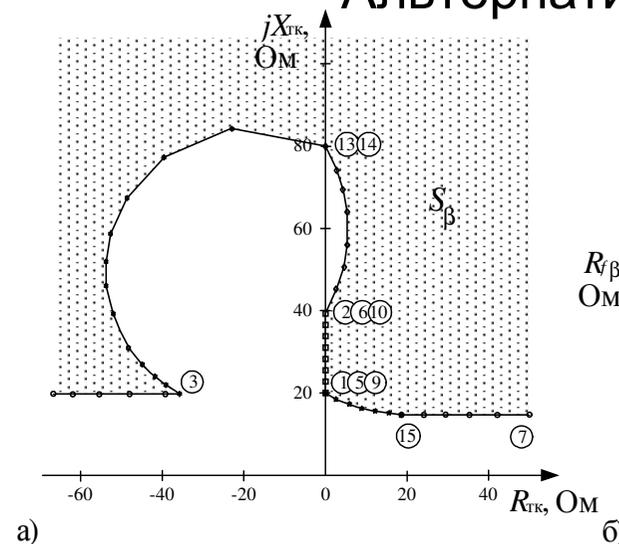
$$\underline{Z}_{\text{TK}} = R_{\text{TK}} + jX_{\text{TK}}$$

Области режимов и граничные режимы

Отслеживаемые режимы



Альтернативные режимы

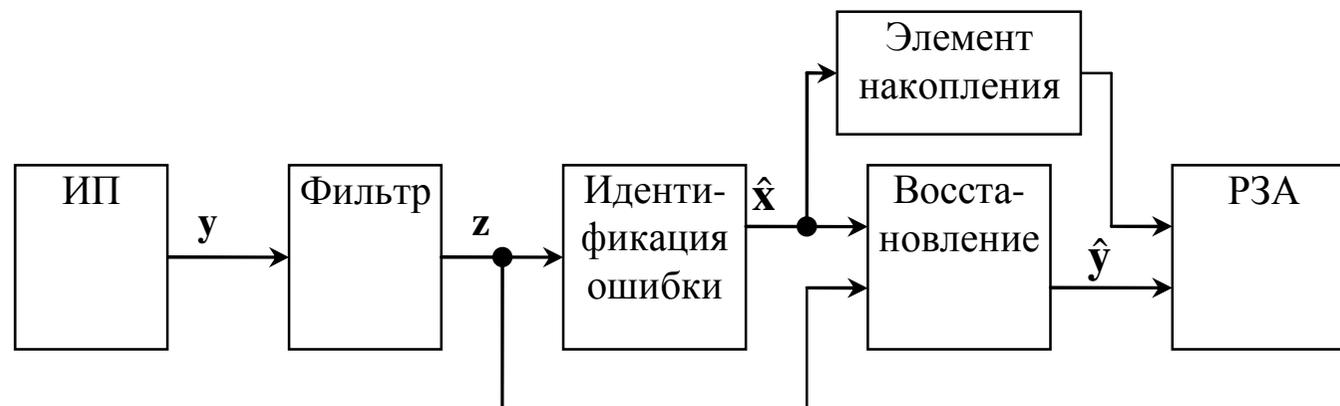


Сбор и анализ информации на ПС для целей РЗА ЛЭП

- верификация входной информации
- эффективное использование информации
- эффективные преобразование информации
- восстановление потерянной или недостающей информации
- сохранение качества информации при передаче

Метод верификации и восполнения измерений на ПС

- **Основная** диагностическая задача – **распознавание режима ошибки** измерений
- **Дополнительная** диагностическая задача – **идентификация** ошибочного измерения и **восстановление** недостающего измерения



ИП – измерительный преобразователь

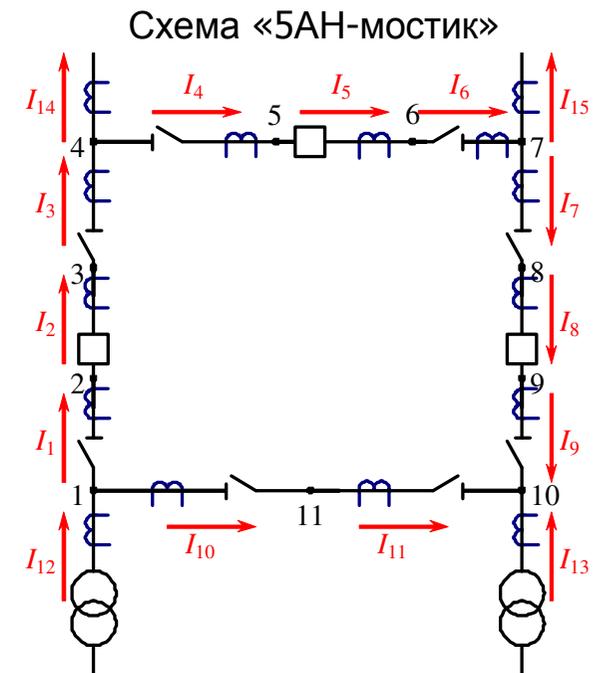
Решение диагностических задач

- Контроль величин токов и напряжений с использованием матрицы инциденций \mathbf{A} , описывающей направленный граф подстанции:

$$\mathbf{A}\mathbf{I} = \mathbf{0} \quad \mathbf{U}^T \mathbf{A} = \mathbf{0}$$

- Простая электрическая цепь предоставляет измерения напряжения всех узлов и токи всех ветвей, причем в каждой ветви располагается не более одного коммутационного аппарата
- Выполнен анализ распознаваемости ошибок измерений
- Разработан топологический алгоритм выявления ветвей с ошибочными измерениями и сигналами состояния коммутационных аппаратов

$$\mathbf{I}' = \mathbf{I} + \Delta\mathbf{I}$$



Схемы дополнены измерительными преобразователями

Дополнительная диагностическая задача

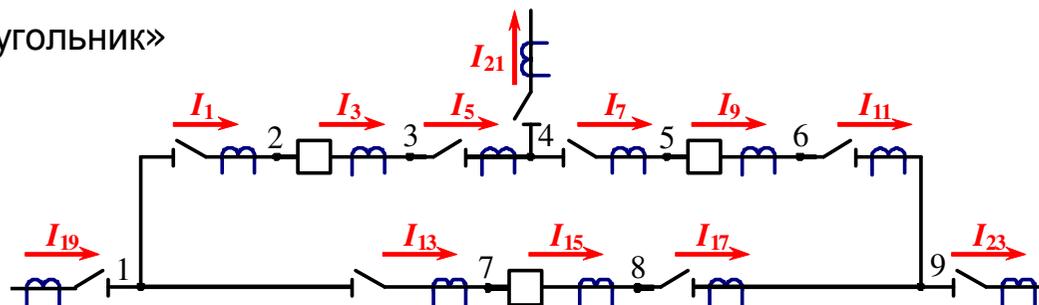
- Система уравнений известных и неизвестных токов для восстановления

$$\mathbf{A}_\alpha \mathbf{I}_\alpha + \mathbf{A}_x \mathbf{I}_x = \mathbf{E} \quad \|\mathbf{E}\| \rightarrow \min$$

$$\hat{\mathbf{I}}_x = (\mathbf{A}_x^T \mathbf{A}_x)^{-1} \mathbf{A}_x^T (-\mathbf{A}_\alpha \mathbf{I}_\alpha)$$

- Решение задачи по методу наименьших квадратов
- Величина невязки является критерием успешности восстановления
- Итерационный алгоритм решения основной и дополнительной диагностических задач
- Топологическая нераспознаваемость приводит к ошибке восстановления
- Результат использования алгоритма – повышение отказоустойчивости РЗА при неисправности измерительных преобразователей и систем связи

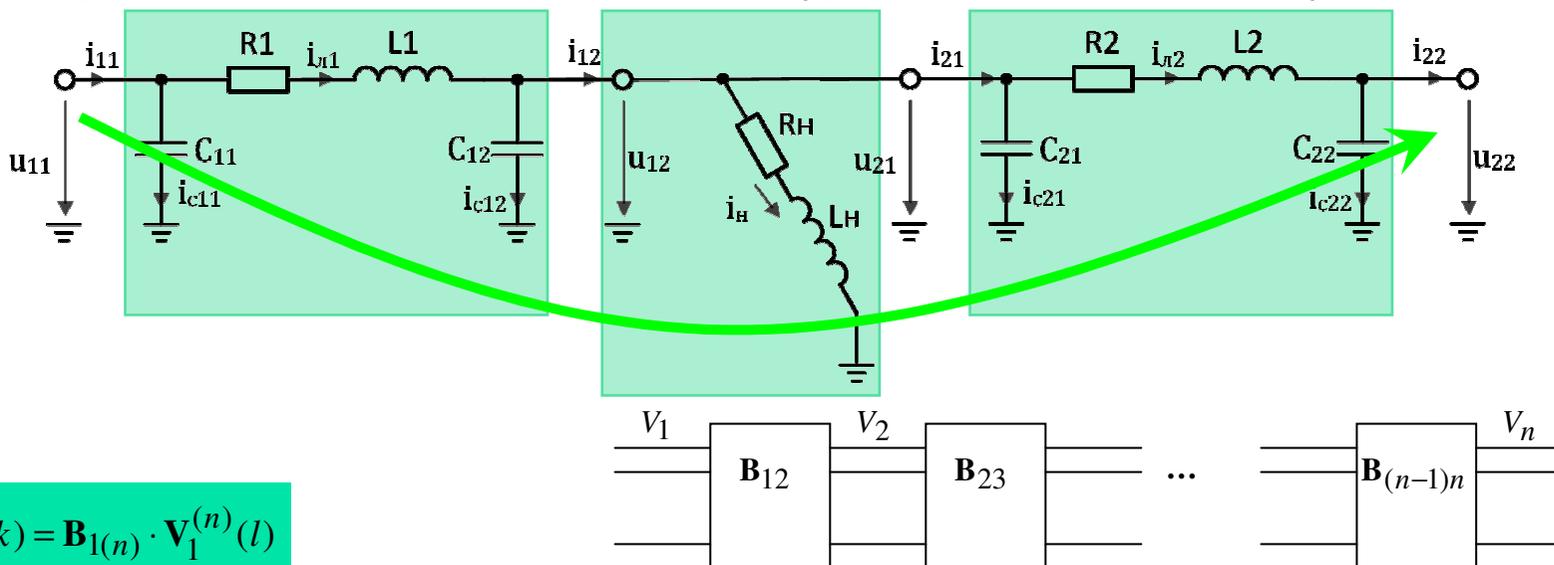
Схема «6Н-треугольник»



Схемы дополнены измерительными преобразователями

Низкочастотная каскадная модель ЛЭП

- Алгоритмическая модель ЛЭП в мгновенных величинах токов и напряжений на основе разностных уравнений отдельных участков



$$\mathbf{V}_n(k) = \mathbf{B}_{1(n)} \cdot \mathbf{V}_1^{(n)}(l)$$

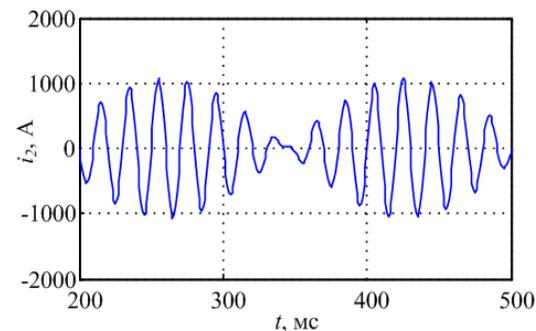
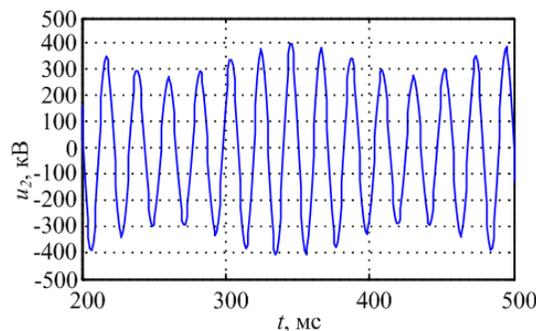
$$\mathbf{V}_1^{(n)}(k) = [\mathbf{V}_1^{(n-1)}(k+d), \dots, \mathbf{V}_1^{(n-1)}(k+d-m)]^T$$

$$\mathbf{B}_{1(n)} = \mathbf{B}_{(n-1)n} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{1(n-1)} & 0 & \vdots & 0 \\ 0 & \mathbf{B}_{1(n-1)} & \vdots & 0 \\ \dots & \dots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{B}_{1(n-1)} \end{bmatrix}$$

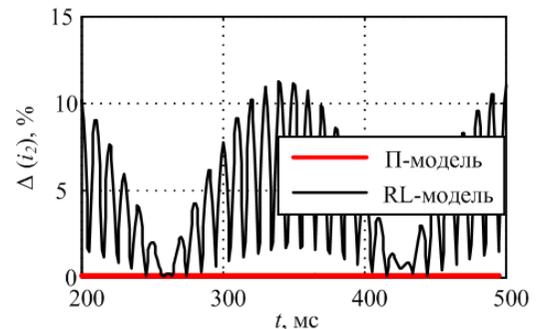
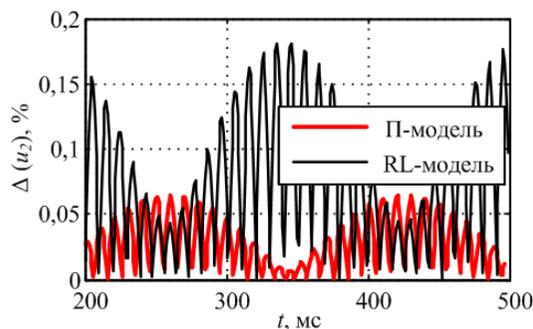
Результаты применения низкочастотной каскадной модели ЛЭП

- Верификация показала высокую сходимость результатов в широком диапазоне частот при моделировании асинхронного режима и качаний: менее 0,2% при задержке расчета не более 2 мс
- Метод отличается низкой частотой дискретизации (в расчетах использованы 1-4 кГц) входных токов и напряжений, а также малыми вычислительными затратами по сравнению с аналогами
- Применение для распознавания асинхронного режима, для дистанционной защиты и ОМП ЛЭП

напряжения и токи
в асинхронном режиме

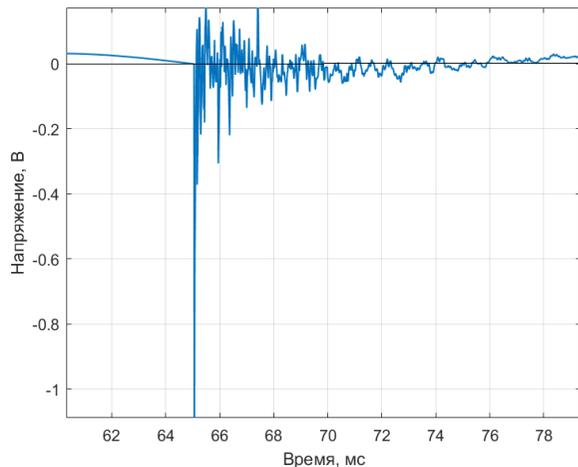


погрешность
различных моделей

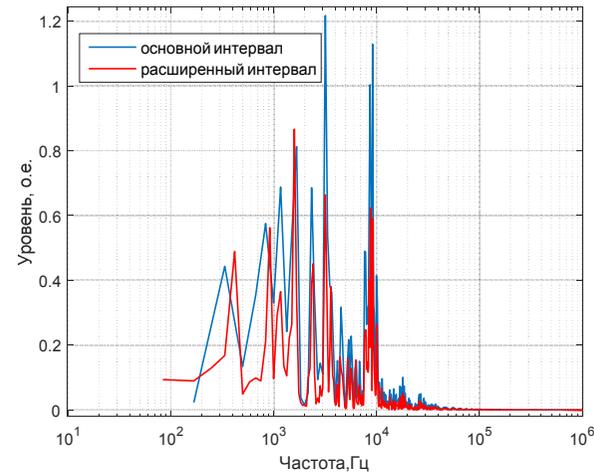


Исследование переходного процесса при КЗ

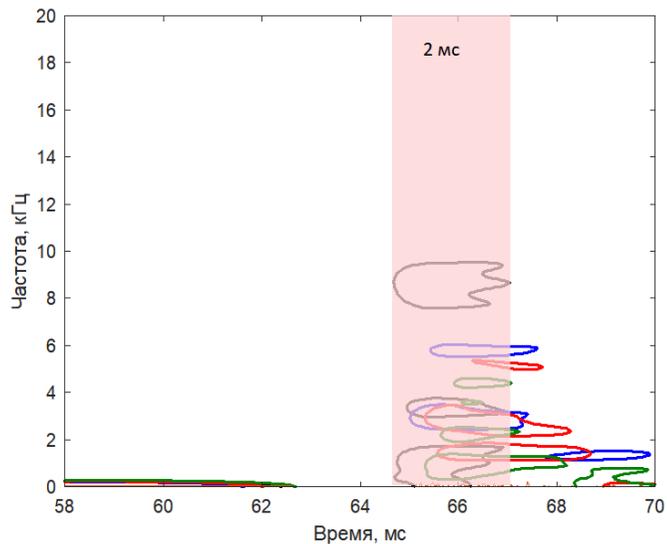
Переходный процесс в напряжении



Спектр напряжения



Спектрограмма напряжения



Наиболее значимые области спектрограмм сигналов напряжения ЛЭП при различных условиях КЗ

- в диапазоне 1–3 кГц
- в пределах 1–3 мс

Модель наблюдаемого сигнала

Модель сигнала

$$u(t) = \sum u_{\text{п}}(t) + \sum u_{\text{с}}(t) + \sum u_{\text{пш}}(t) + u_{\text{нш}}(t)$$



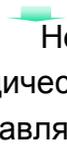
Принужденные периодические составляющие



Свободные составляющие переходного процесса



Периодический квазистационарный шум



Непериодический шум

Плотность распределения вероятности

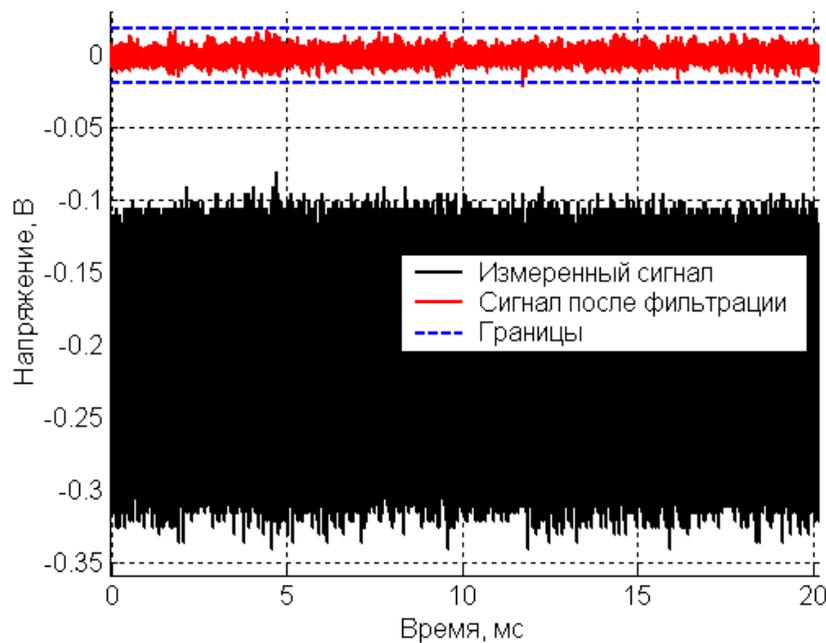
$P(C)$ – измерение 2021 года

$P(D)$ – измерение 2022 года

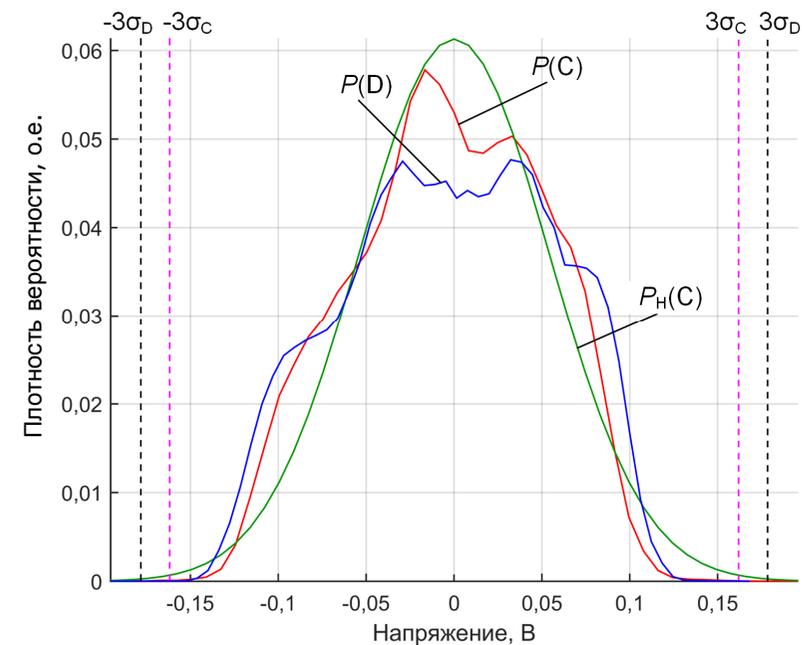
$P_{\text{н}}(C)$ – нормальное распределение

Условие срабатывания измерительного органа

$$|u'(k)| \geq v_{\text{уст}}$$



Сигналы на ПС 330 кВ Выборгская



Статистический измерительный орган волнового ОМП

Модель измерительного органа с использованием коэффициента эксцесса

$$\gamma_2 = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3$$

$$\gamma_2 \geq \Gamma$$

$$\mu_4 = E(X - EX)^4 \quad - \text{четвертый центральный момент}$$

$$\sigma = \sqrt{E(X - EX)^2} \quad - \text{стандартное отклонение}$$

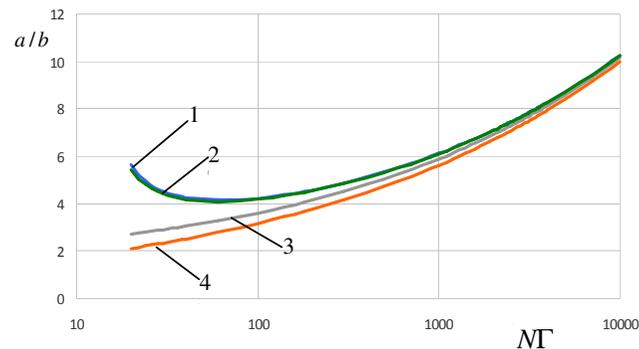
X – выборка длиной N

Сигнал переходного процесса	Режим до коммутации	Результаты исследования a – приращение сигнала; $b = \sigma_{\text{пд}}$
Ступенчатый	Нулевой	$\gamma_2 = N - 5 + \frac{1}{N-1}$
	Нормальное распределение	$\gamma_2 = \frac{3}{N-1} - \frac{6}{M} + \frac{N+1}{M^2} - \frac{2}{M^2(N-1)} \quad M = (b/a)^2 N + 1$ $SNR \approx 10 \lg(3 + \sqrt{N\Gamma}) \approx 5(\lg N + \lg \Gamma) \quad (b/a)^2 \approx \frac{1}{3 + \sqrt{N\Gamma}} - \frac{1}{N}$
	Периодический сигнал	$\gamma_2 = \frac{3}{2(N-1)} - \frac{3}{M} + \frac{3}{M(N-1)} + \frac{N}{M^2} - \frac{1}{2M^2} - \frac{7}{2(N-1)M^2} - \frac{3}{2}$ $(b/a)^2 \approx \frac{1}{1,5 + \sqrt{N(\Gamma + 1,5)}} - \frac{1}{N}$
Линейно нарастающий $x_{N-n+m} = kbm$ $m = \overline{1, n}$	Нормальное распределение	$\gamma_2 \approx \frac{k^2 n^2 - 10}{5 \cdot \left(\frac{2}{3} + \frac{N}{k^2 n(n+1)^2} \right)} \quad \gamma_2 \approx \frac{k^4 n^3 (n+1)^2}{10N}$

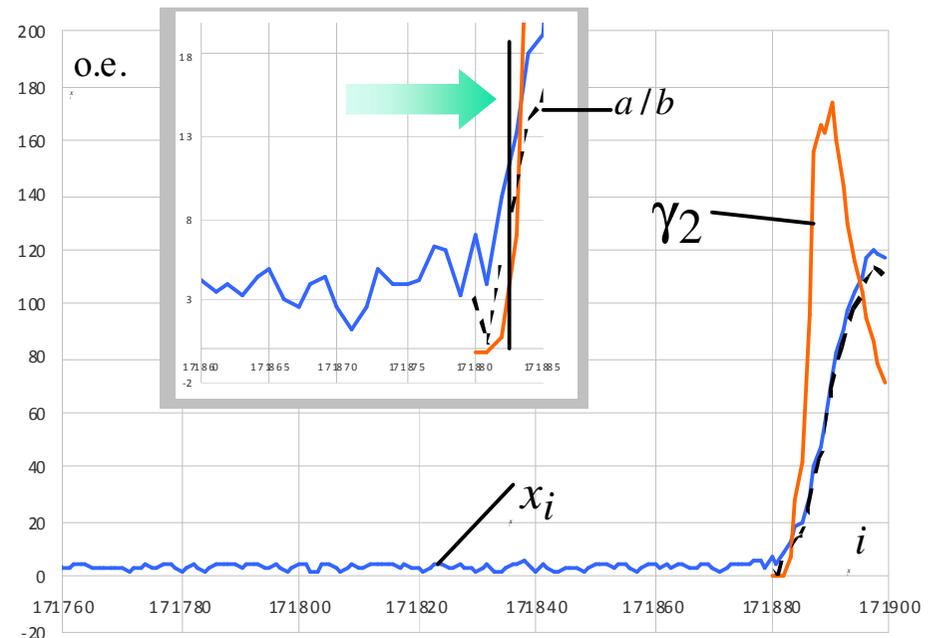
Результаты аналитического анализа статистического измерительного органа

- Поведение измерительного органа универсально описывается величиной срабатывания при отклонении a и среднеквадратическим отклонением
- Исследование позволяет проектировать заданную **избирательность** и **чувствительность** измерительного органа, **компенсировать** задержку срабатывания в зависимости от характеристик процессов
- Разработаны алгоритмы пуска и выявления фронта для модуля пассивного волнового ОМП серийных терминалов TOP 300 ЛОК 550, TOP 300 ВОМП и перспективного терминала TOP 300 ВОЛНА

Чувствительность измерительного органа
в зависимости от параметров срабатывания



Срабатывание измерительного органа
на осциллограмме сигнала на ПС 220 кВ Томмот



Идентификация параметров ЛЭП по двухсторонним измерениям устройствами волнового ОМП

- Определение весовой функции \mathbf{g} путем идентификации на основе уравнения Винера-Хопфа в дискретной матричной форме относительно входа X и выхода Y

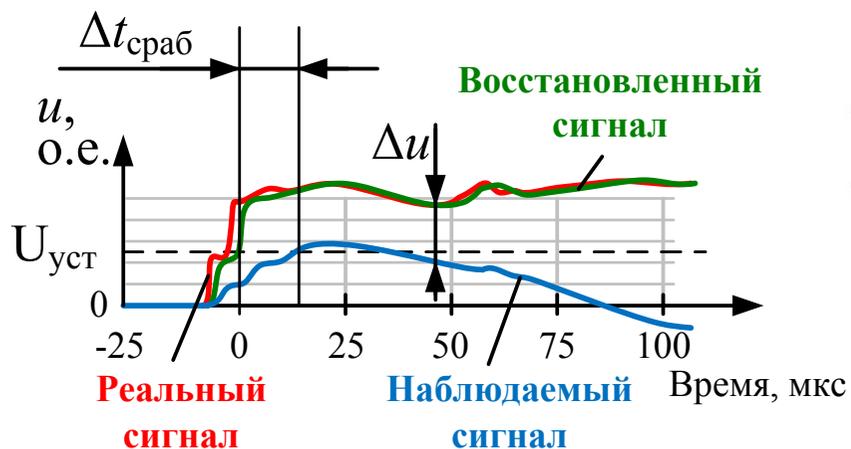
$$\mathbf{g} = \frac{1}{\Delta t} \mathbf{R}_{XXm}^{-1} \mathbf{R}_{YX}^T$$

$$\hat{\mathbf{x}} = \frac{1}{\Delta t} \mathbf{g}_r * y$$

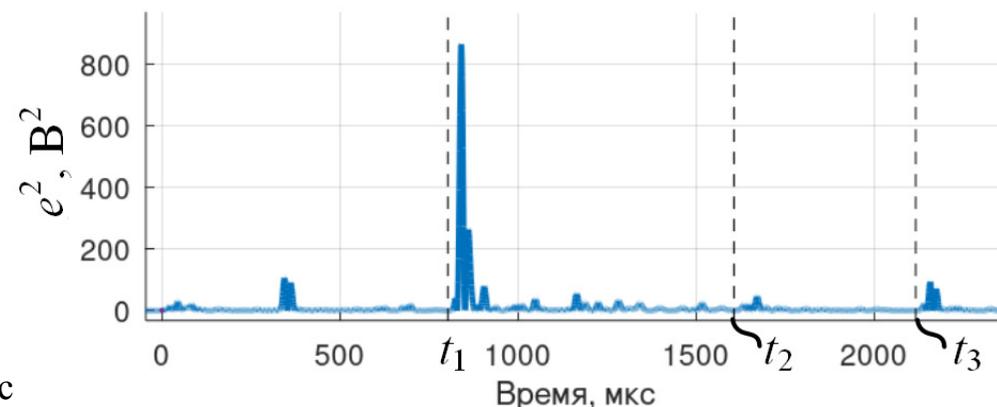
$$e^2 = |\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x}'|^2$$

- При восстановлении первичного напряжения по данным вторичной стороны электромагнитного трансформатора погрешность снижена на 87%
- Получена модель участка ЛЭП, структурно согласованная с неповрежденным объектом. Модель использована для выявления структурных изменений сигнала в ЛЭП во времени

Восстановление первичного напряжения



Ошибка идентификации во времени



Метод волновых рядов для ОМП

Волновой ряд

$$\mathbf{T}_{\text{абс}} = \mathbf{B}[x_f \ L]^T + \mathbf{T}_0$$

Невязка

$$\varepsilon = \left\| \mathbf{A}[x_f \ L]^T - \mathbf{T} \right\|$$

Обобщенное уравнение оценки

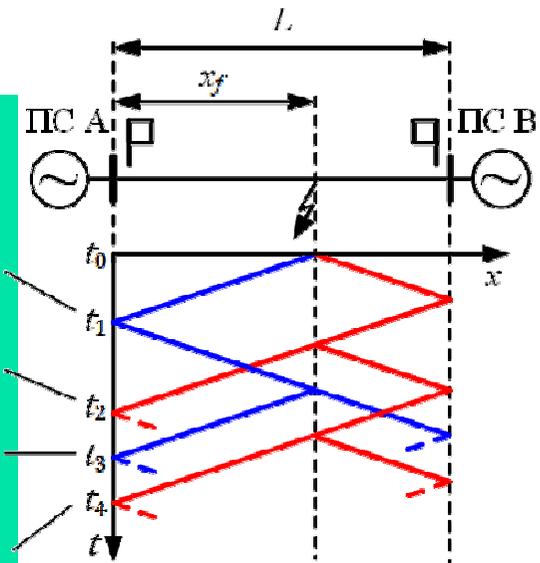
$$\mathbf{A}_x x'_f + \mathbf{A}_L L = \mathbf{T} + \mathbf{A}_\tau \tau \Leftrightarrow \mathbf{A}[x'_f \ L^T \ \tau] = \mathbf{T}$$

Шаблон А

$$\frac{1}{v} \cdot x_f = t_1 - t_0$$

$$\frac{1}{v} \cdot (-x_f + 2L) = t_2 - t_0$$

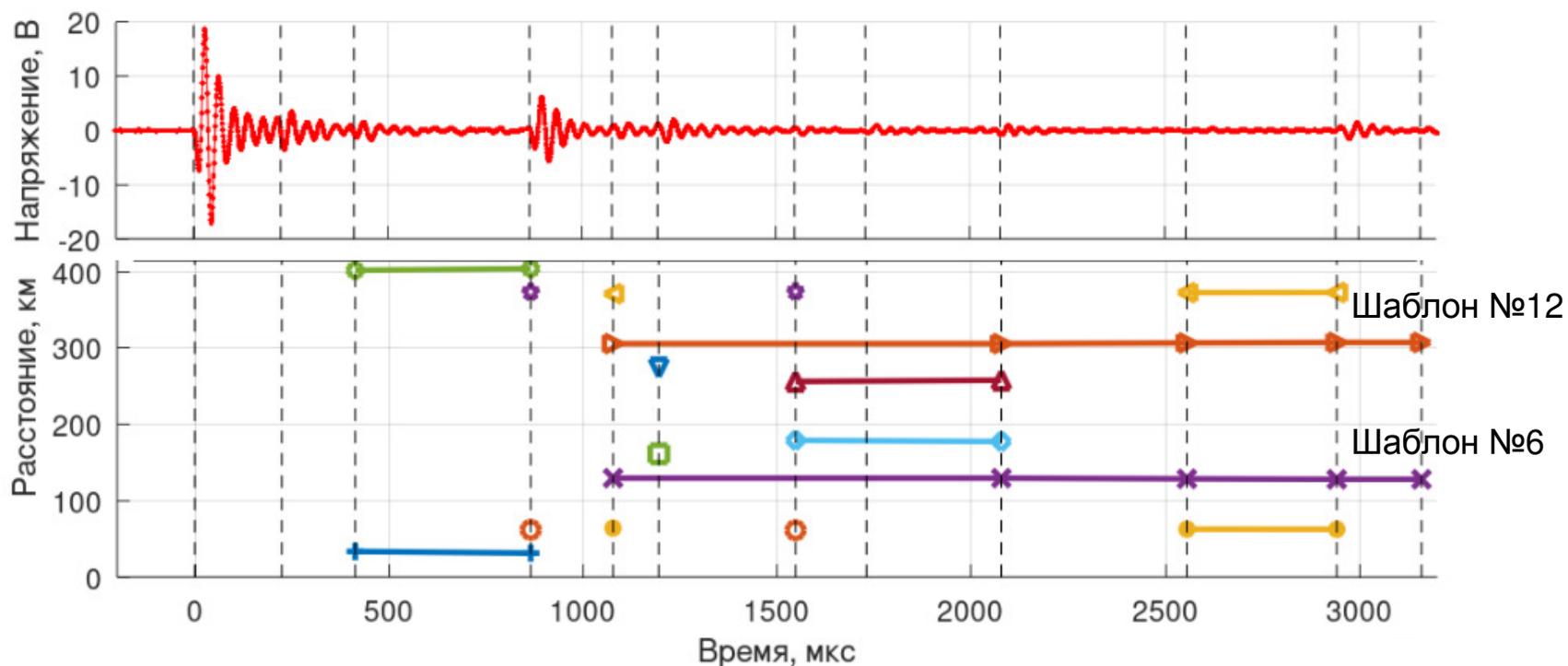
$$\frac{1}{v} \cdot 3x_f = t_3 - t_0$$

$$\frac{1}{v} \cdot (-3x_f + 4L) = t_4 - t_0$$


Решаемые задачи ОМП

- 1) **одностороннее** ОМП
- 2) многостороннее ОМП на основе **несинхронизированных** односторонних измерений
- 3) многостороннее ОМП при **абсолютной синхронизации** времени подстанций
- 4) оценка **параметров** функционирования системы ОМП по известным параметрам повреждения

Результаты применения метода волновых рядов на осциллограммах реальных КЗ



Погрешность

- **одностороннего** волнового ОМП при различных КЗ на ЛЭП – от 1,0 до 3,5 км (от 0,2% до 0,8% от длины ЛЭП)
- ОМП по ПАР – от 2,0 до 5,5 км

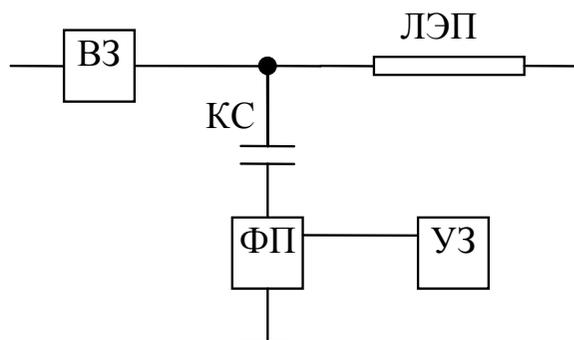
Уточнение места КЗ при накоплении числа волн

	Номер волны				
	5	9	10	11	12
\hat{x}_f , км	129,8	129,8	128,7	128,1	128,1
Δx_f , км	2,7	2,7	1,6	1,0	1,0

Истинное расстояние до КЗ – 127,1 км

Активное зондирование ЛЭП

Схема подключения активного локационного устройства



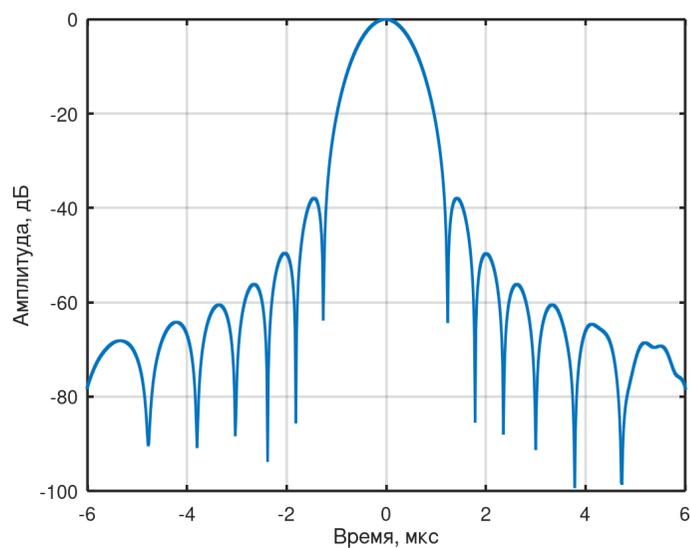
Зондирующий сигнал

$$u(t) = U(t) \cos(2\pi f_H t + \beta t^2 / 2)$$

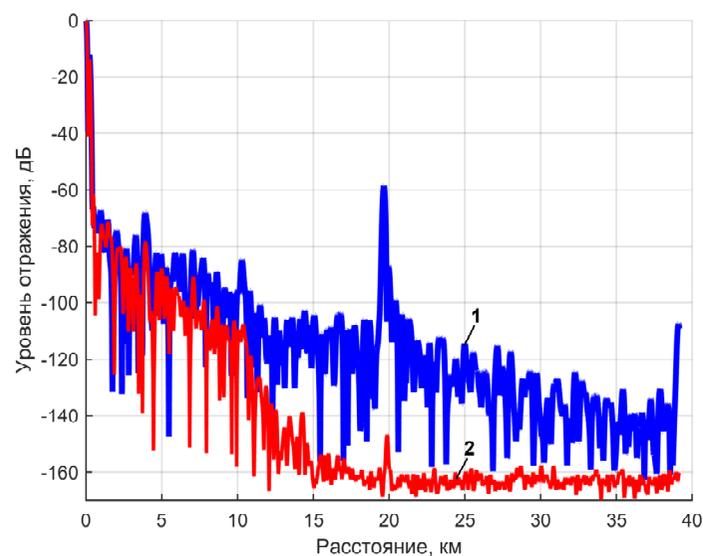
$$\beta = \Delta f / \tau_{\text{И}} \quad \Delta f = f_{\text{К}} - f_{\text{Н}}$$

УЗ – устройство РЗА
ВЗ – высокочастотный заградитель
КС – конденсатор связи
ФП – фильтр присоединения

Результат автокорреляционной обработки зондирующего импульса



Рефлектограммы ЛЭП до (кривая 1) и после образования ГИО (кривая 2)



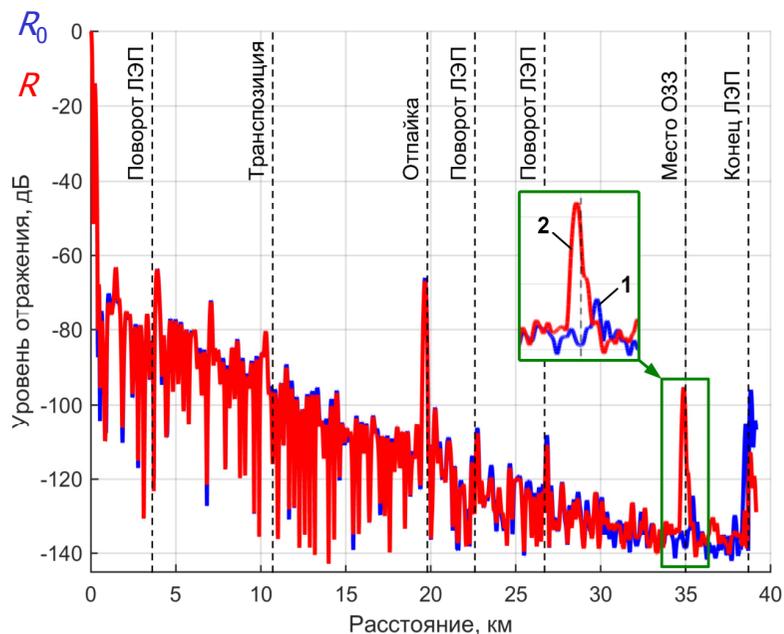
Выявление повреждений ЛЭП

Исключение излишнего срабатывания измерительного органа при накоплении затухания в режимах малого отклонения электрических параметров ЛЭП, а также повышение чувствительности на 10 дБ

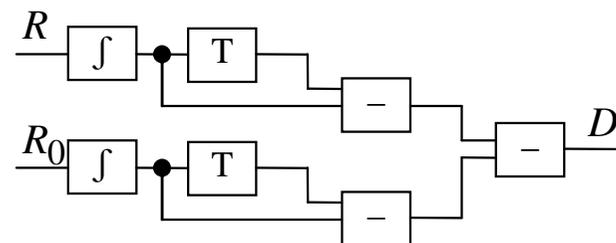
Измерительный орган на основе дефектограммы

$$D(x) = R(x) - R_0(x)$$

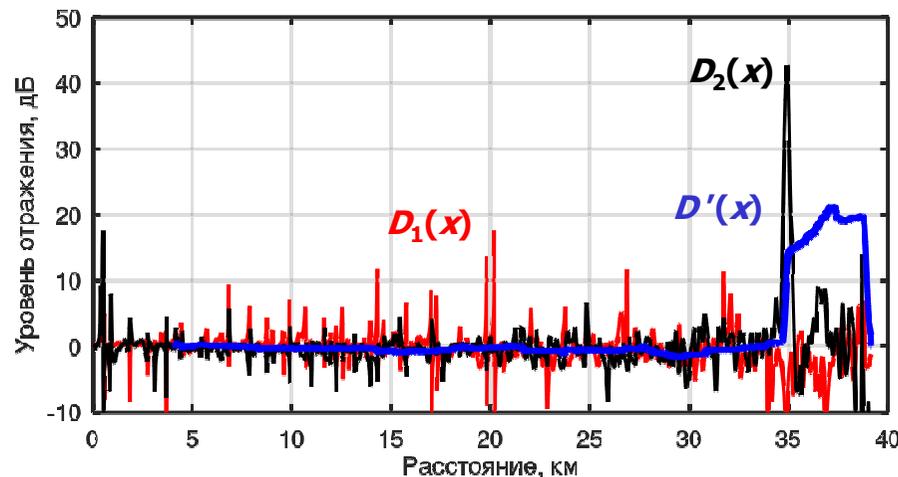
Рефлектограммы: 1 – опорная, 2 – при однофазном замыкании на землю



Новая схема измерительного органа



Рабочие величины измерительных органов



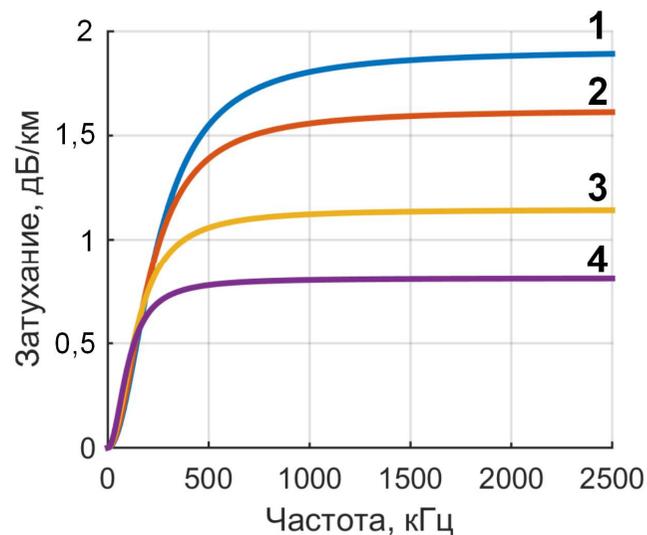
Дистанционная диагностика ЛЭП средствами активного зондирования

- Метод позволяет дистанционно оценивать наличие, местоположение (с точностью до участка) и толщину стенки гололедно-изморозевых отложений (ГИО) вдоль ЛЭП

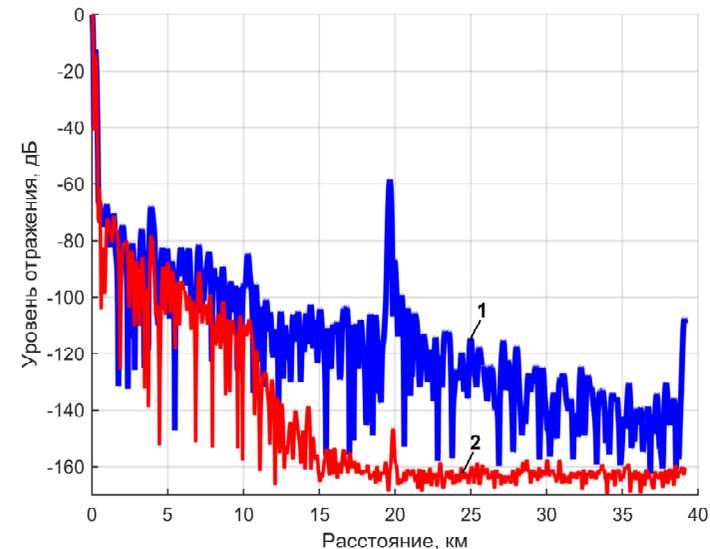
$$\alpha_{\text{измк}} = \frac{D(x_k) - D(x_{k-1})}{2(x_k - x_{k-1})}$$

$$d_{\text{ГИО}k} = r_{\Pi} (10^{\alpha_{\text{измк}}} / \hat{K}(f, Z, T) - 1)$$

Теоретическое затухание при разной температуре:
1 – 0°C, 2 – -3°C, 3 – -6°C, 4 – -10°C

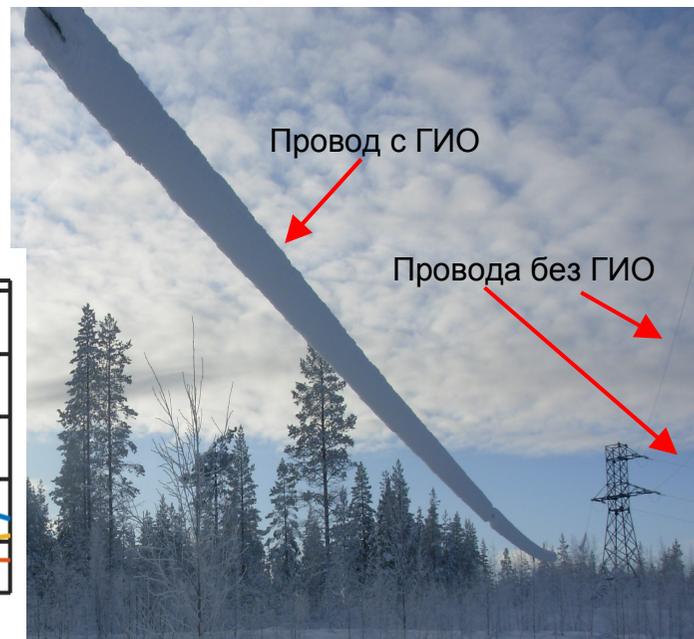
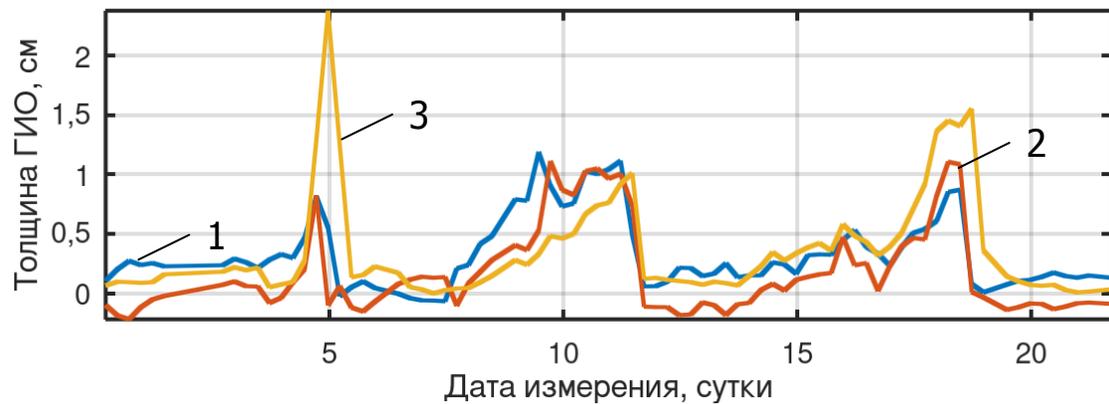
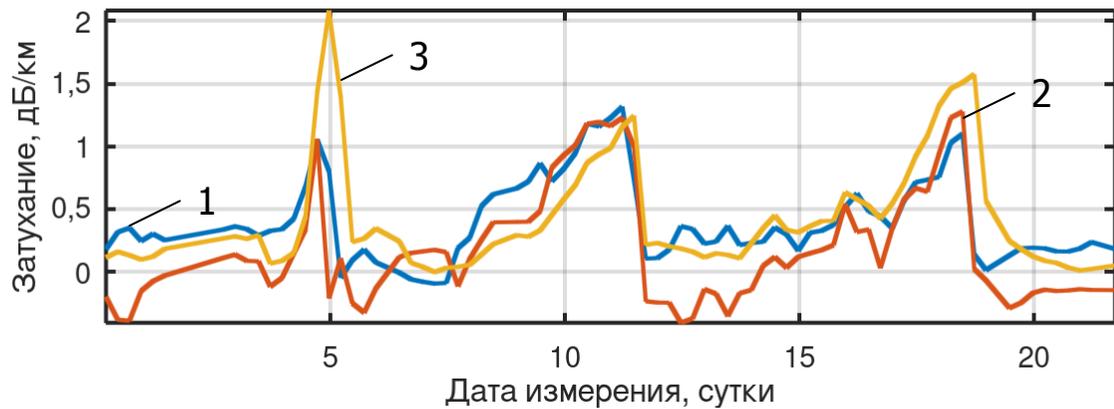


Рефлектограммы: 1 – опорная, 2 – после образования ГИО

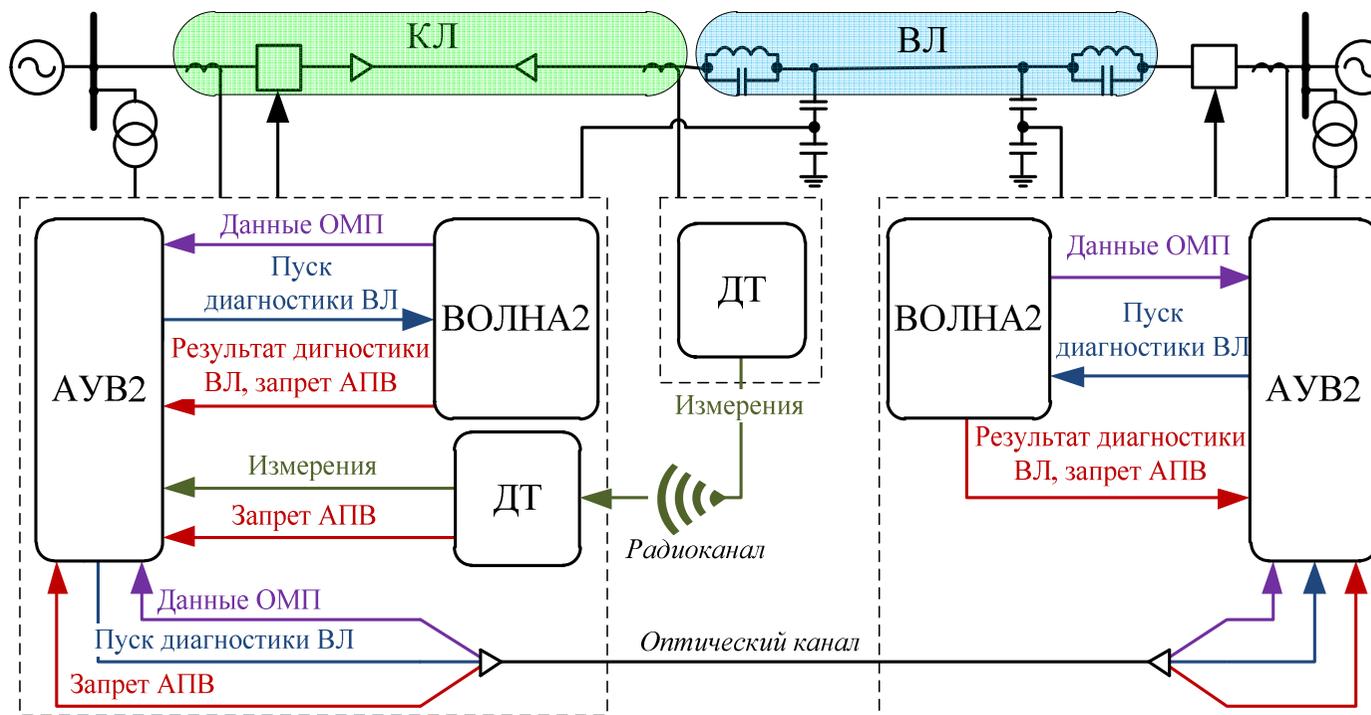


Дистанционная диагностика ЛЭП средствами активного зондирования

Оценка толщины стенки гололеда на трех участках с использованием данных о температуре вдоль трассы ЛЭП

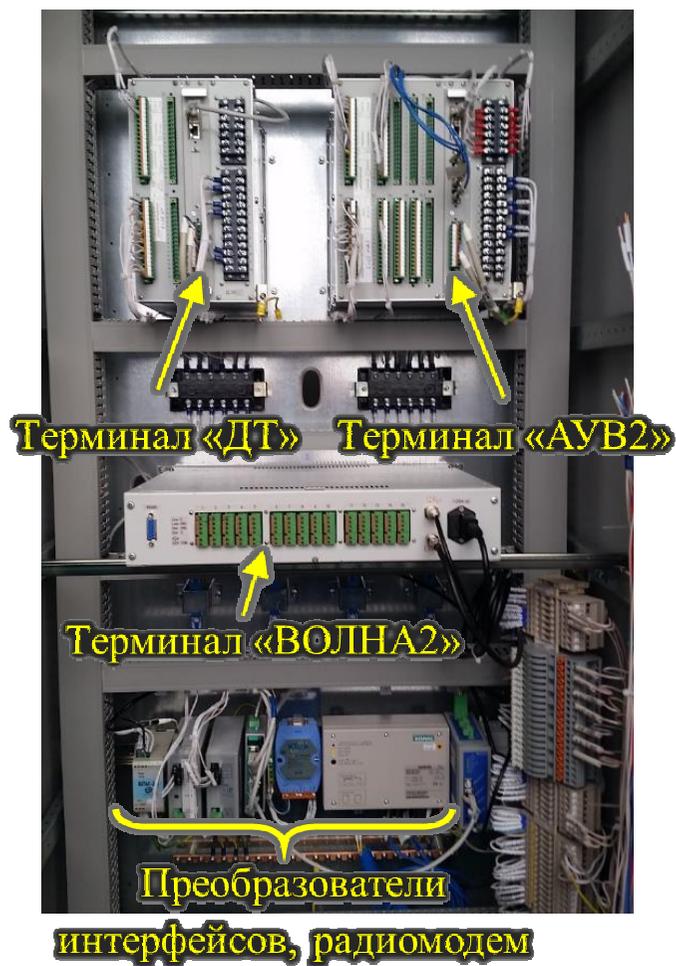


Комплекс АПВ с контролем неповрежденного состояния КВЛ



Терминал	Функция
АУВ2	Автоматика управления выключателем (АУВ), автоматическое повторное включение (АПВ), ОМП по параметрам аварийного режима (ПАР), выявление зоны повреждения, централизованное ОМП
ДТ	Регистрация токов в момент КЗ
ВОЛНА2	ОМП методом активного зондирования и пассивным волновым методом

Элементы АПВК на подстанции



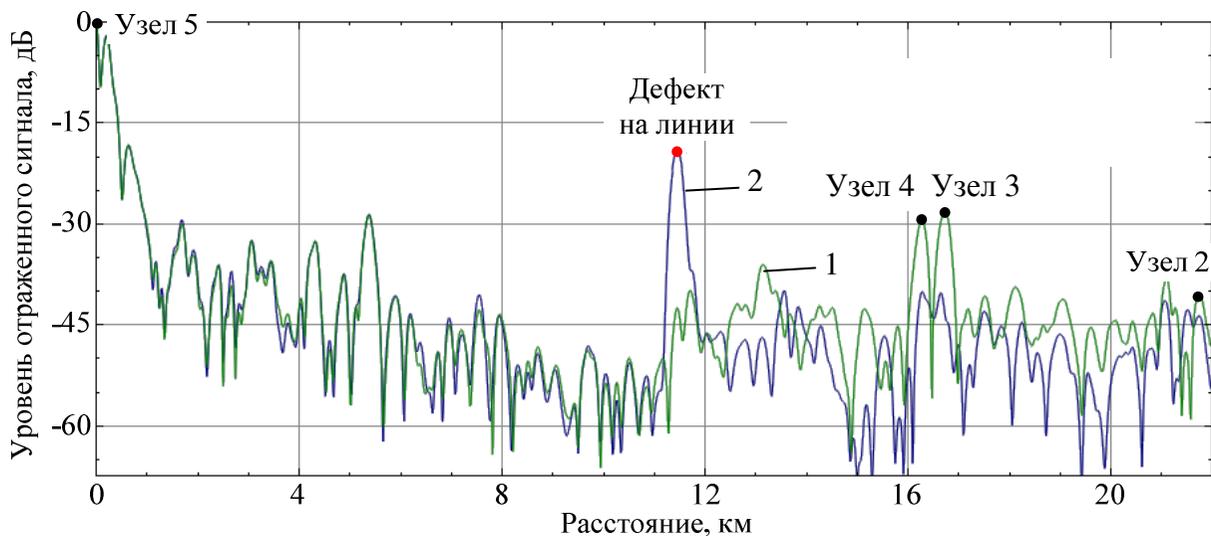
Опытная эксплуатация комплекса АПВК

- Комплекс АПВК установлен в опытную эксплуатацию
- Натурные испытания при вводе в опытную эксплуатацию показали высокую точность ОМП на отключенной ЛЭП в условиях имитации бестоковой паузы цикла АПВ, а также правильный запрет АПВ в условиях подачи ТОКОВ

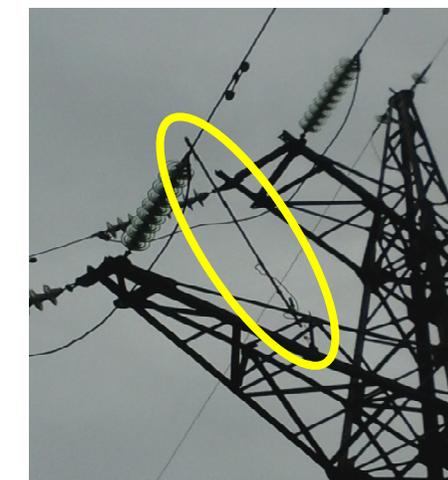
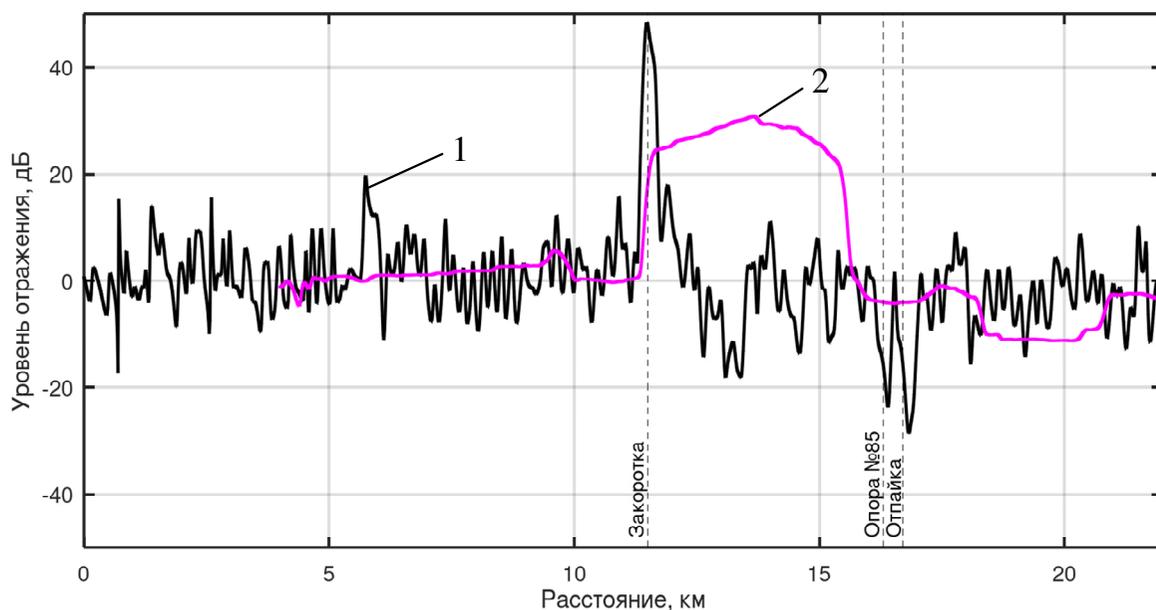


№	Вид повреждения	x_f , км	Сигнал запрета АПВ	$ \hat{x}_f - x_f $, км
1	Однофазное КЗ, фаза «А»	21,0	+	0,2-0,6
2	Однофазное КЗ, фаза «С»	21,0	+	
3	Междуфазное КЗ, фазы «В» и «С»	21,0	+	
4	Двухфазное КЗ на землю, фазы «В» и «С»	21,0	+	
5	Трехфазное КЗ без земли	21,0	+	
6	Однофазное КЗ, фаза «А»	16,1	+	0,1-0,5
7	Однофазное КЗ, фаза «В»	16,4	+	0,3
8	Однофазное КЗ, фаза «С»	16,4	+	
9	Однофазное КЗ, фаза «А»	11,4	+	0,1-0,8
10	Однофазное КЗ, фаза «С»	5,3	+	0,1-0,7

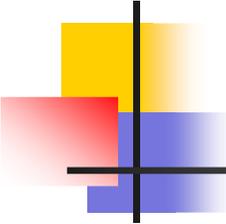
Результаты обработки рефлектограмм



Рефлектограммы неповрежденной (кривая 1) и поврежденной (кривая 2) ЛЭП – опора №58, однофазное КЗ ф.«А», замер со стороны ПС Костино

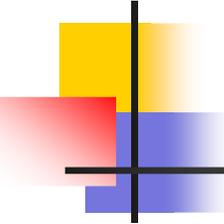


Дефектограмма (кривая 1) и модифицированная дефектограмма (кривая 2) ЛЭП – опора №58, однофазное КЗ ф.«А», замер со стороны ПС Костино



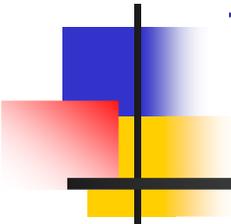
Выводы

1. **Методы** пространственно-временной обработки сигналов позволяют синтезировать новые **обучаемые** измерительные органы в задачах защиты и автоматики ЛЭП с улучшенными характеристиками.
2. Технические решения **верификации** и **восполнения** измерений повышают информированность устройств РЗА в условиях избыточной информационной базы и инфраструктуры энергообъекта при отказах измерительных преобразователей и систем связи.
3. **Каскадные модели** участка электрической сети выполняют пространственно-временное преобразование измерений тока и напряжений для синтеза распознающих модулей РЗА ЛЭП для задач АЛАР, дистанционной защиты и ОМП с погрешностью моделирования напряжения менее 0,2% при задержке расчета не более 2 мс.
4. **Метод волновых рядов** реализует принцип **нарастающей** информационной базы волнового ОМП ЛЭП с односторонним и многосторонним наблюдением. На осциллограммах натуральных испытаний погрешность одностороннего расчета составила от 0,2 до 0,8% от длины линии.
5. Алгоритмы **пуска и выявления фронта** для модуля пассивного волнового ОМП серийных терминалов TOP 300 ЛОК 550, TOP 300 ВОМП обеспечивают высокую избирательность и надежность функционирования со снижением запаздывания срабатывания до 13 мкс.
6. Обработка высокочастотного сигнала повышает устойчивость активного локационного ОМП к помехам на 10 дБ. Выявлена возможность **дистанционного оценивания гололедной обстановки** на участках воздушной ЛЭП с использованием подстанционного устройства. Результаты разработок легли в основу макетного образца терминала TOP 300 ВОЛНА.
7. Объединение принципов ОМП по параметрам аварийного режима, активного и пассивного волнового ОМП повышает надежность функционирования **АПВ кабельно-воздушных ЛЭП**.



Перспективы развития системотехники РЗА

- Повышение чувствительности и быстродействия устройств РЗА
- Расширение использования информационных признаков
- Применение методов в задачах
 - Автоматика ликвидации асинхронного режима на основе синхронизированных измерений токов и напряжений
 - Активная высокочастотная диагностика линий путем множественных и многосторонних измерений с оценкой обледенения проводов
 - Развитие пассивных волновых методом ОМП на основе односторонних и многосторонних измерений
 - Реализация принципов нарастающей информационной базы в задачах защиты ЛЭП



Системотехника защиты и автоматики линий электропередачи с использованием пространственно-временной обработки токов и напряжений

ПОДШИВАЛИН Андрей Николаевич, д.т.н.

Заместитель директора по науке

АО «ВНИИР»

anpodshivalin@vniir.ru