

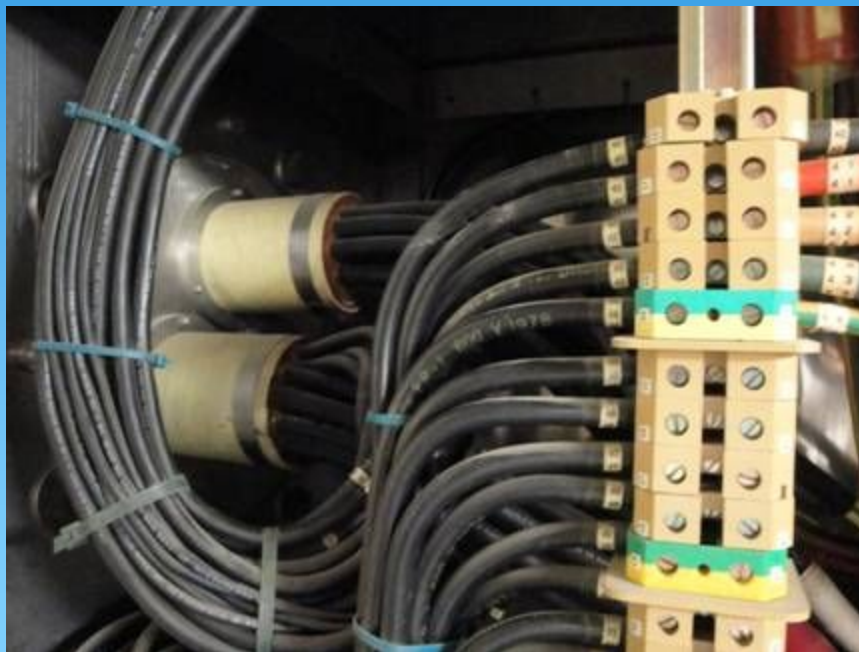
ЭнергоПроект

с о с т о я н и я

э л е к т р и ч е с к и х

к а б е л е й

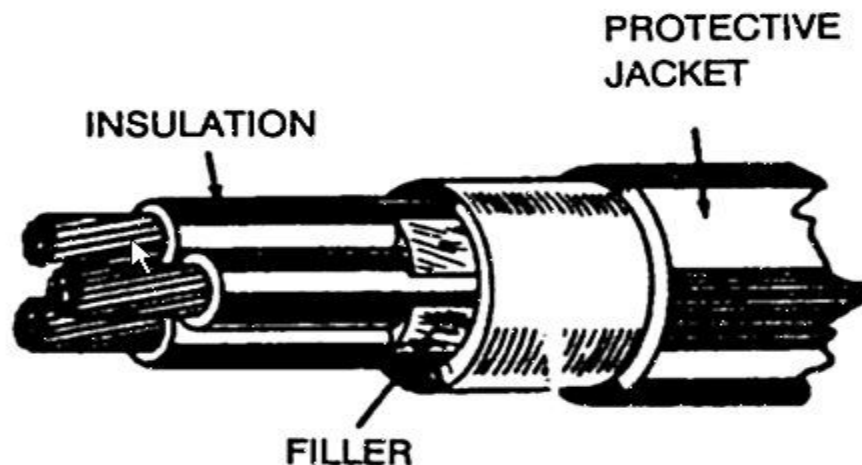
Т е х н о л о г и я LIRA



Дмитрий Копченков, Технический Директор, Санкт-Петербург
Пауло Ф. Фантони, Технический Директор, Норвегия

Старение электрических кабелей

- Условия эксплуатации ведут к проблемам с изоляцией кабелей и сохранности оболочки. Параметры влияющие на **Старение**:
 - Температура
 - Механическое напряжение
 - Гамма-облучение
 - Влажность, пар
- Длительный срок эксплуатации кабелей в тяжелых условиях может привести к **деградации** изоляции и, следовательно, к потере функциональности



Резонансный Анализ Линии (LIRA)

- Резонансный Анализ Линии (Line Resonance Analysis -LIRA)
- На основе частотного анализа данных высокочастотных **резонансных эффектов** несогласованных линий электропередачи.
- Чувствителен к малым изменениям электрических параметров кабелей, в основном к диэлектрической проницаемости изоляции, которые являются важным показателем состояния кабеля (температурное и радиационное старение, влажность, дефекты изоляции, механические повреждения).
- Возможность **обнаружить и локализовать** малые изменения изоляции, несмотря на разные структуры (тип изоляция, геометрия) и эффекты не связанные со старением.

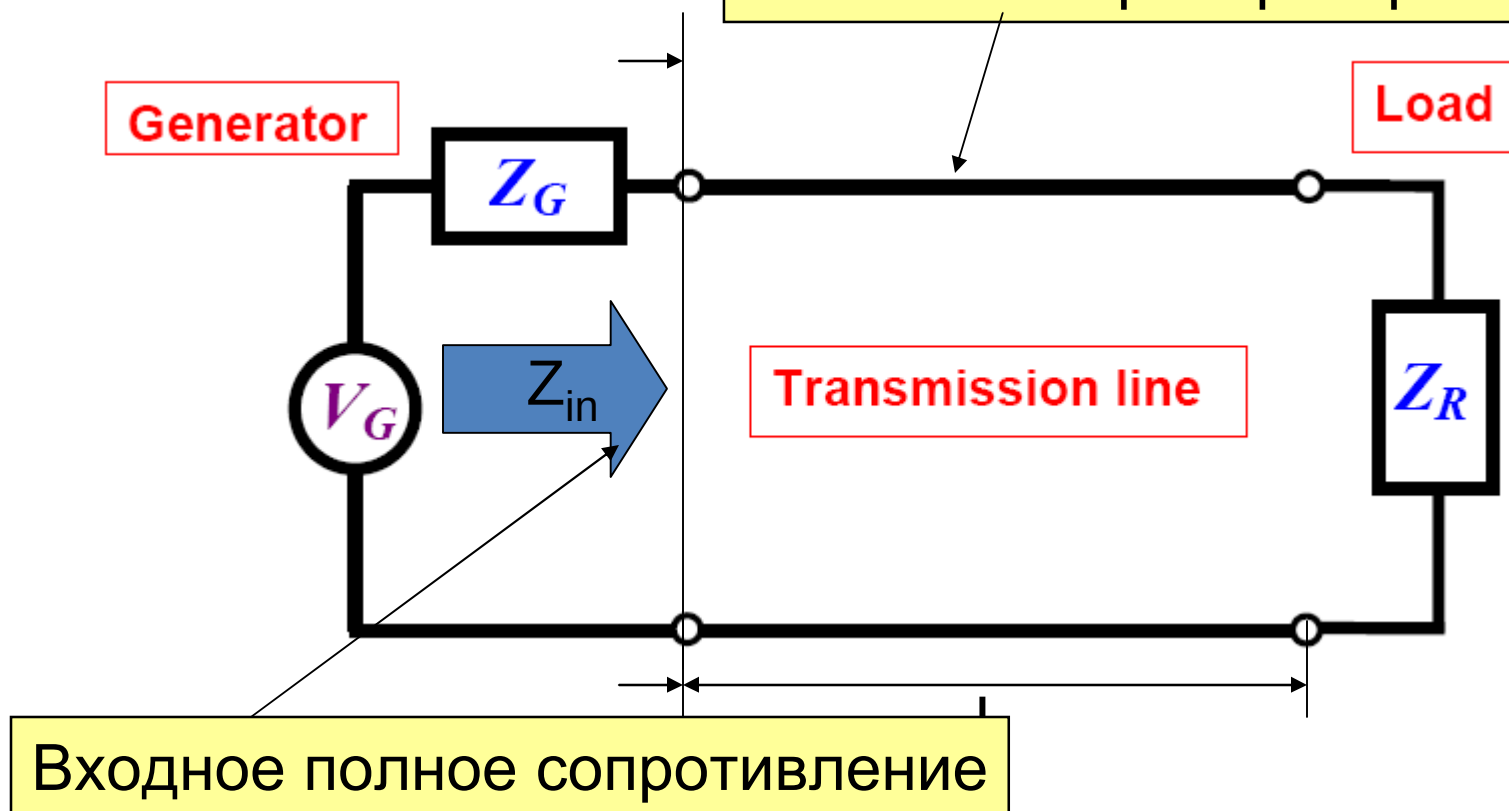
Резонансный Анализ Линии (LIRA)

- Взаимосвязь между состоянием изоляции характеристиками изоляционного диэлектрического материала.
 - изменения диэлектрической постоянной, в основном емкости, ведет к изменениям полного сопротивления кабеля (глобально и локально).
- На основе теории линий электропередачи
 - рассчитывает и анализирует комплексное полное сопротивление линии в зависимости от приложенного сигнала в широкой полосе частот.
- Специализированное портативное измерительное оборудование, встроенное в кейс со степенью защиты IP67
- Фирменное программное обеспечение для анализа отказов, анализа деградации и моделирующими программами.

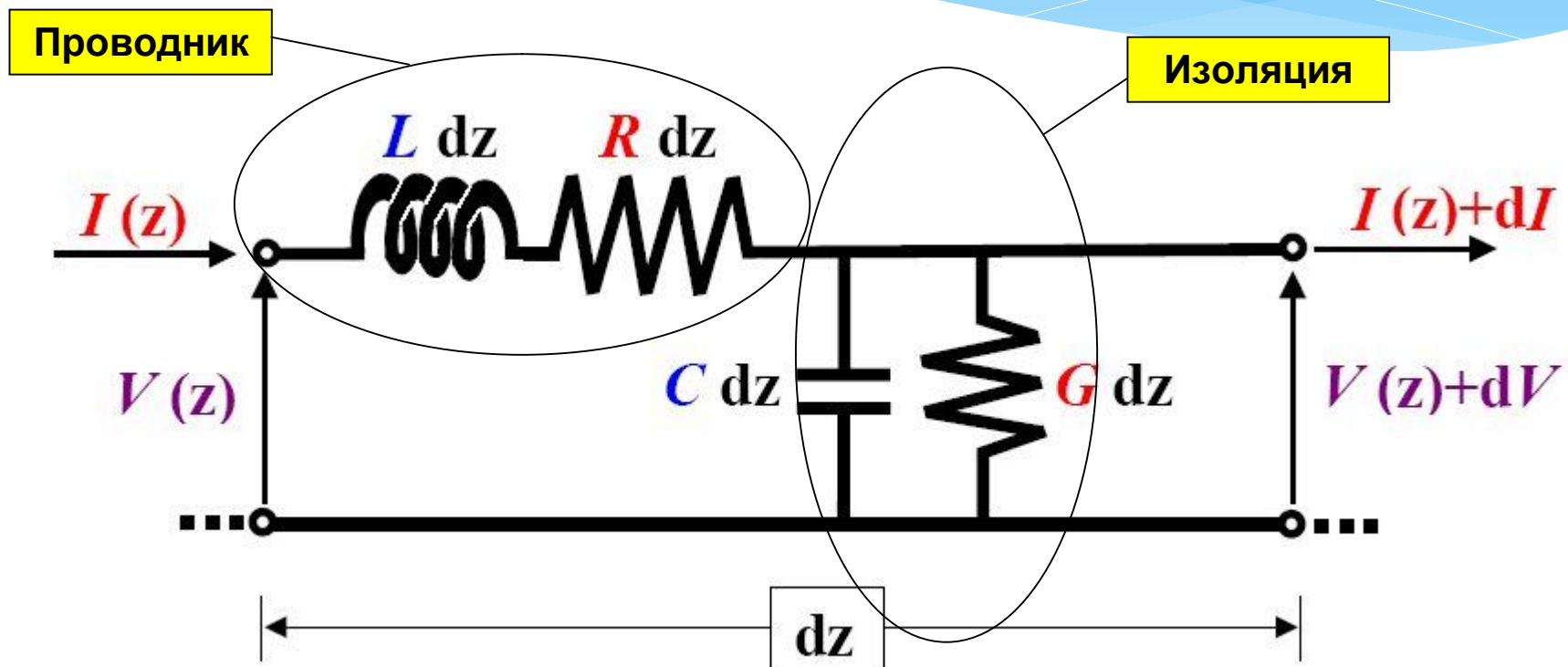


Теория Линий Электропередачи

Волновое сопротивление $Z_0(\omega)$
Постоянная распространения $\gamma(\omega)$



Электрические параметры в кабеле



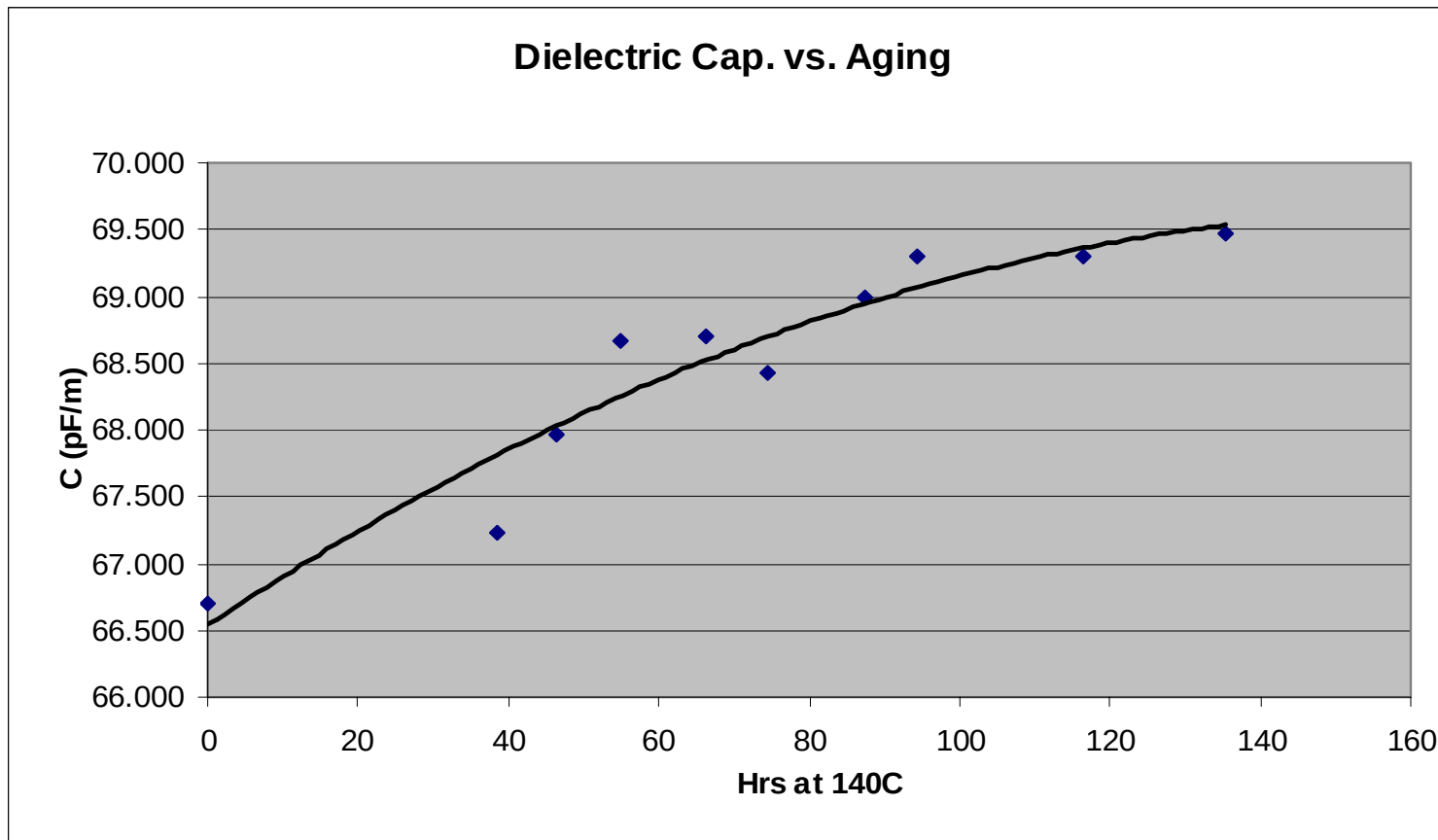
R ... последовательное сопротивление

L ... последовательная индуктивность

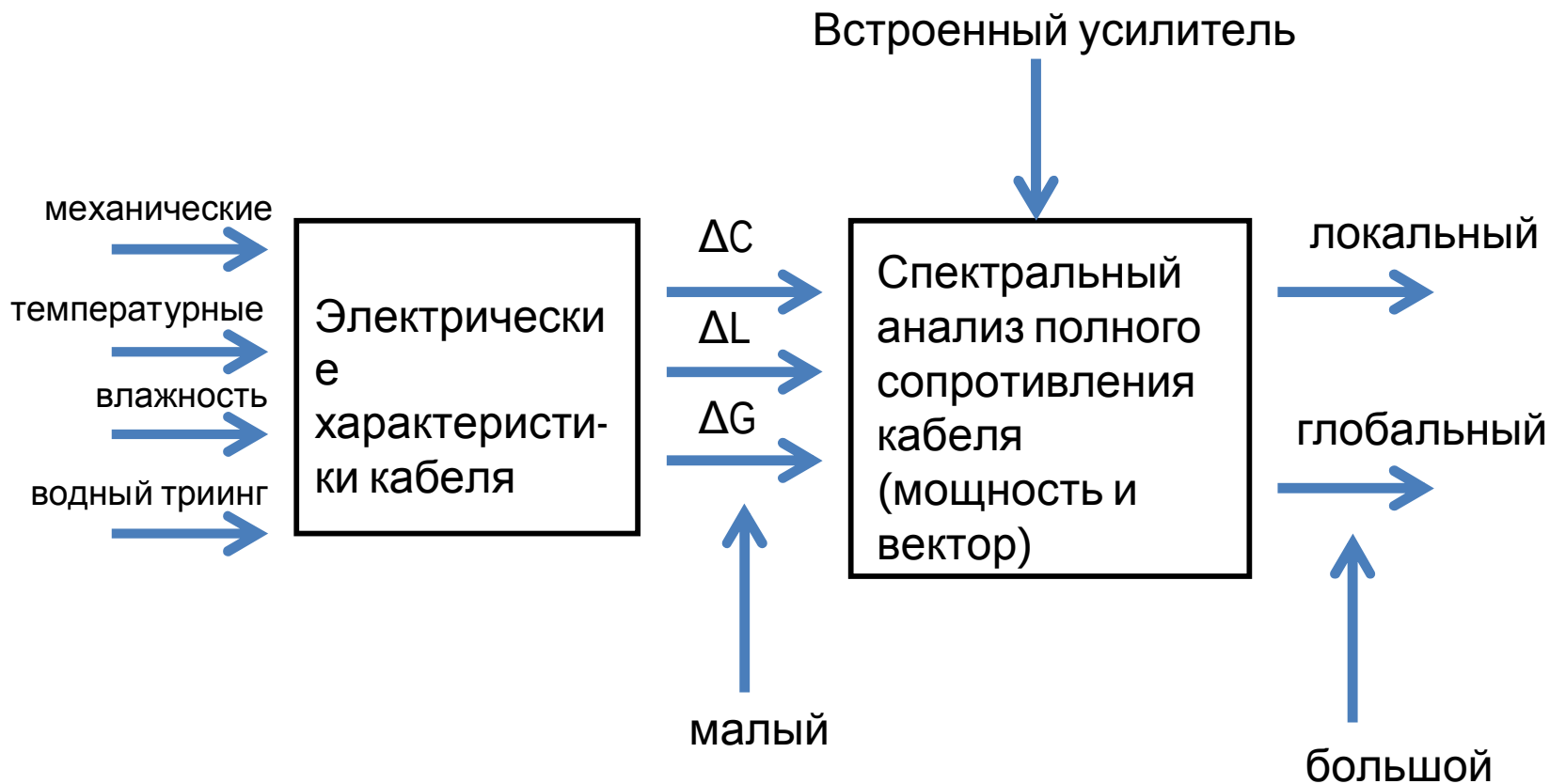
G ... параллельная проводимость

C ... параллельная емкость

Диэлектрическая Емкость в зависимости от Старения – СКЭП (EPDM)



Широкополосный частотный анализ данных полного сопротивления кабеля



Резонансный анализ кабелей

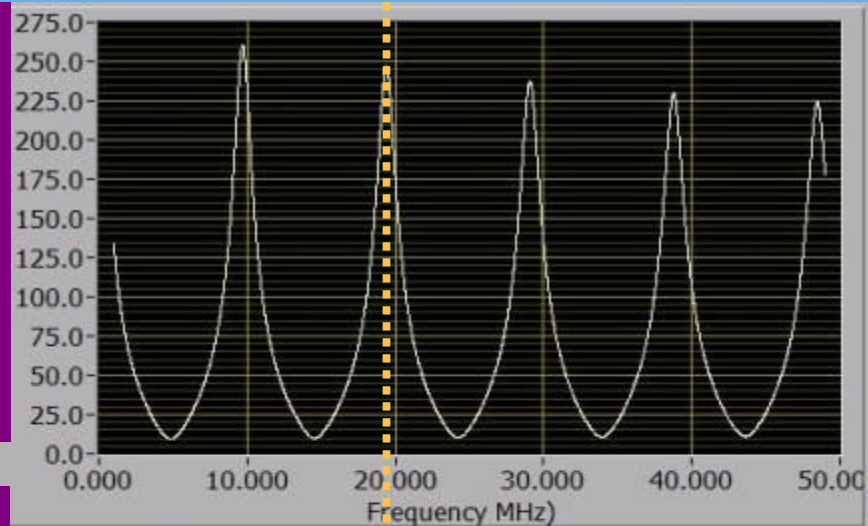
На всех резонансных частотах, сдвиг фазы полного сопротивления кабеля равен нулю

Резонансная частота является функцией длины кабеля и характеристик кабеля

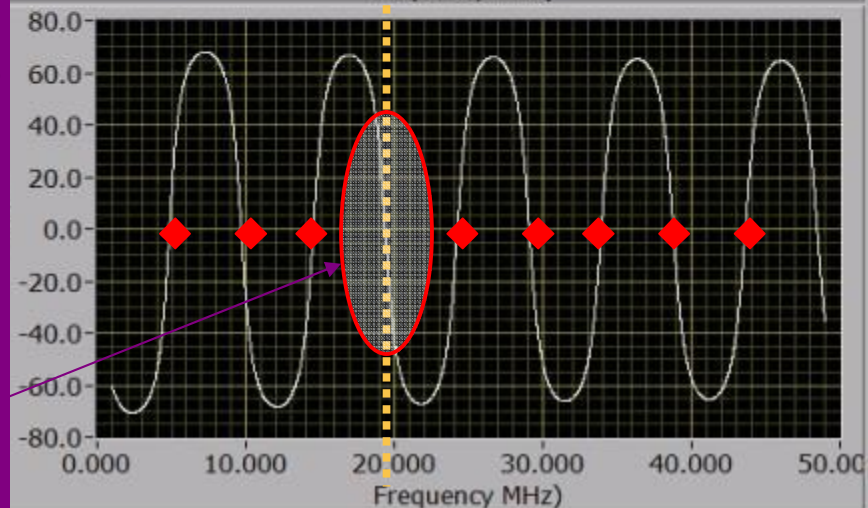
Пиковые значения полного сопротивления кабеля (на резонансных частотах) являются функциями нагрузки и затухания в кабеле

резонанс

Амплитуда полного сопротивления (Ω)



Фаза полного сопротивления (Градусы)



Затухание и Длина

- Затухание является сложным фактором :

$$\alpha(\text{дБ} / \text{км}) = g(f, d, C, L, \text{материал})$$

Общее затухание = $\alpha \cdot \text{длина}$

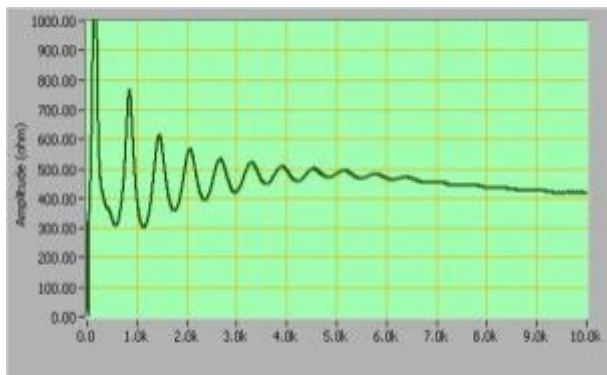
- f (пропускная способность) является управляющим параметром для компенсации длины кабеля

Общее Правило Затухания :

$$\text{Общее Затухание (дБ)} = 2\alpha(\text{дБ/км}) \cdot \text{length(km)} < 50 \text{ дБ при максимальной частоте}$$

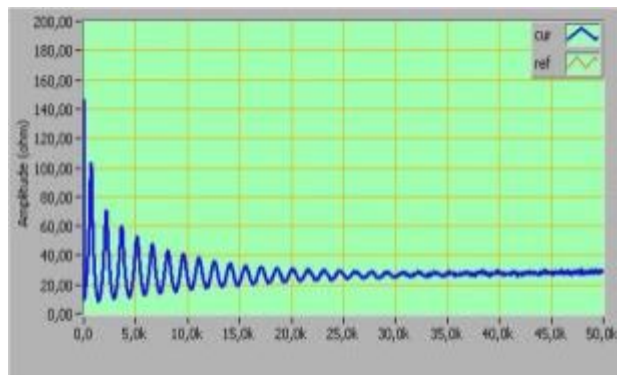
~100 км, ПЭ/Си 14 мм²

ПЭ Полимер Этилена (PE)



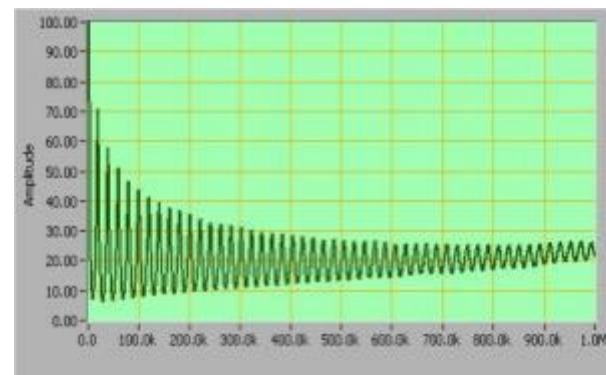
~47 км, PILC/Cu 700 мм²

с бумажной изоляцией покрытый свинцом (PILC)

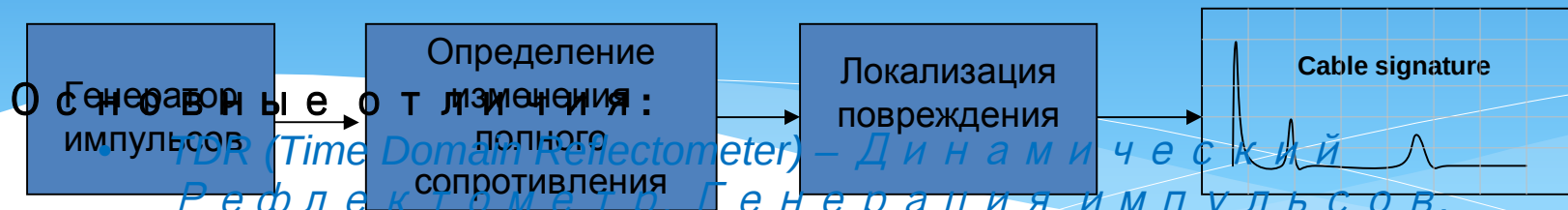


~4 км, ПЭ-С/Си 240 мм²

ПЭ-С полимер этилена с поперечно сшитыми молекулами (XLPE)



Сравнение LIRA и TDR (Time Domain Reflectometer)



TDR (Time Domain Reflectometer) – Динамический Рефлектометр. Генерация импульсов, следующих по кабелю, с возможностью выбора различной ширины импульса (стандартно 50 нс - 5 мкс)

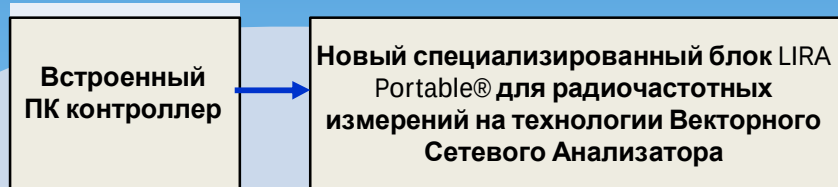
- **LIRA.** Генерация ВЧ развертки (ширина полосы 0 -100 МГц, размах амплитуды приблизительно 3В)
- *TDR.* Определяет изменение сопротивления по наличию отраженного импульса в местах его отражения.
- **LIRA.** Преобразование во времени $Z(t) \rightarrow Z(t')$. Производит анализ амплитуды и фазы спектральной мощности.

Преимущества LIRA:

- Меньшее влияние помех, а поэтому более чувствительный и точный.
- Больше возможностей сосредоточиться в **зоне молчания на ближнем конце** и измерить **длинные кабели**.

LIRA Portable – Функциональная схема

Оборудование – LIRA Portable®

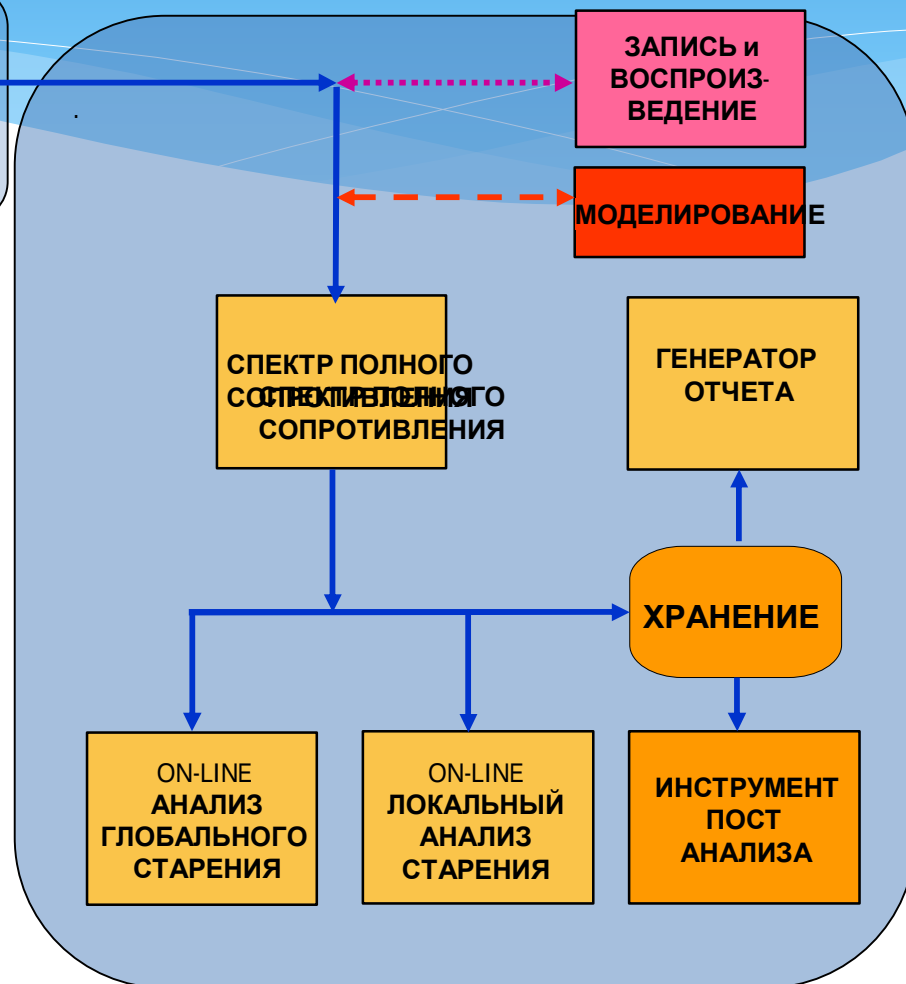


ПОДКЛЮЧЕНИЕ
КАБЕЛЯ

LIRA Portable®



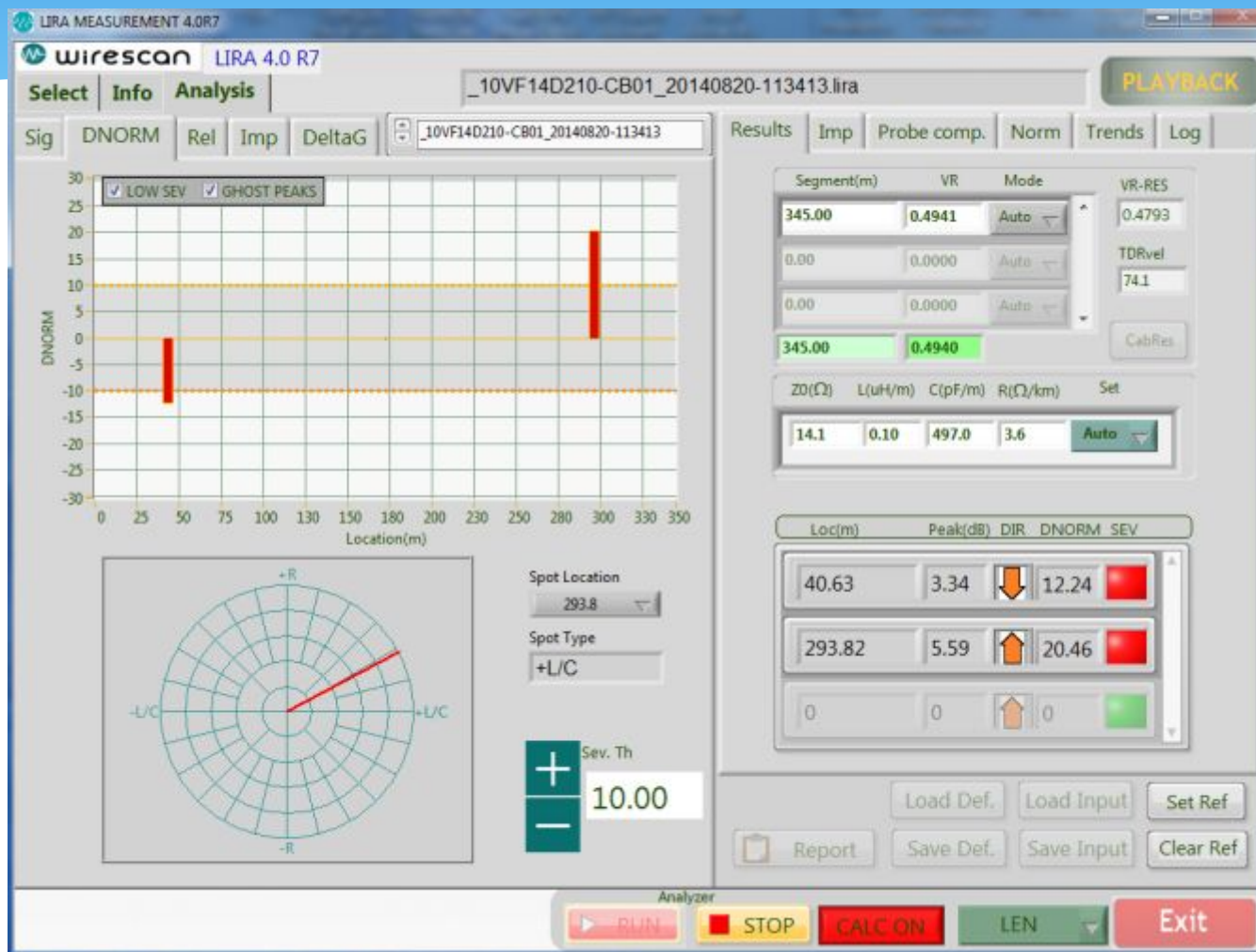
Программное обеспечение – LIRA Portable®



Локальная и глобальная деградация

- **Локальная Деградация**
 - Специфика конкретных секции(й) кабеля
 - Механические повреждения/напряжения
 - Водный триинг, тепловое окисление
- **Глобальная деградация**
 - Применимо для всего кабеля
 - Общее старение
 - Окисление в однородных средах

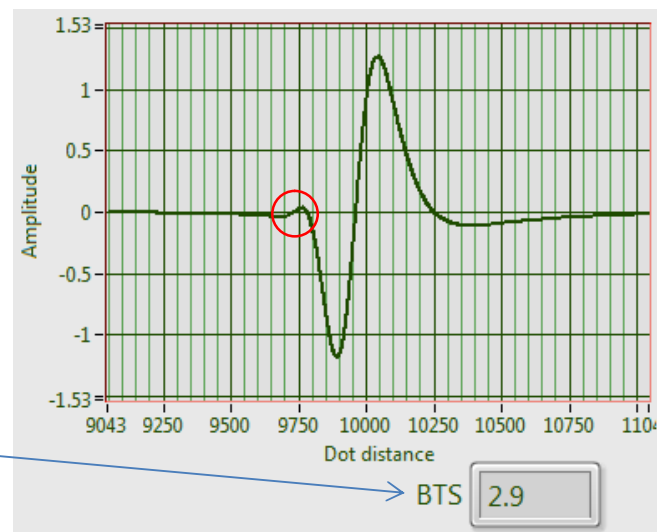
Анализатор LIRA определение точек



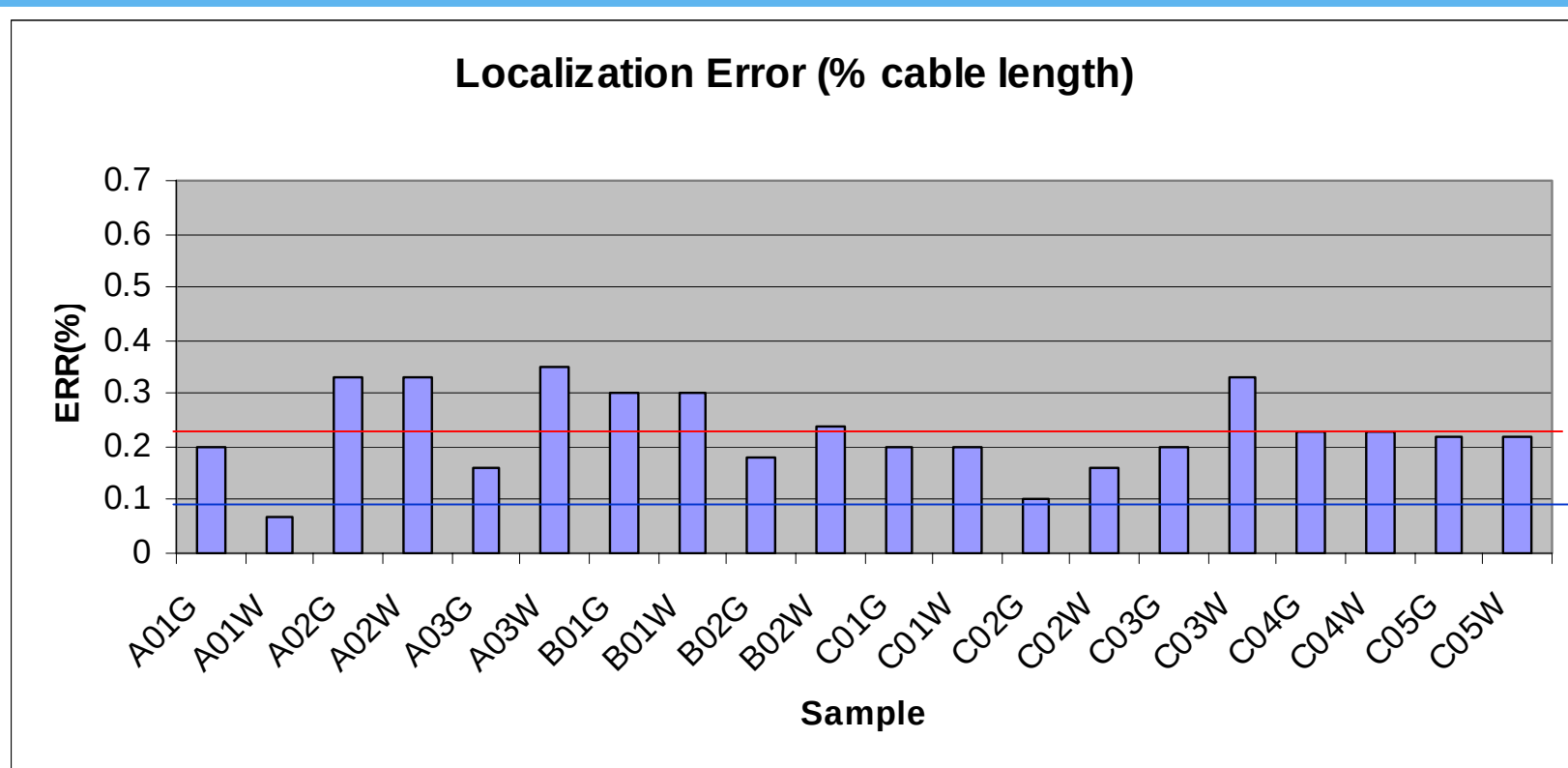
Обнаружение локальной деградации

Горячие точки показаны в DNORM (плотность вероятности нормального распределения)

- Система LIRA чувствительна к небольшим изменениям полного сопротивления кабеля
- Ошибка локализации в среднем менее 0,3% от общей длины
- Оценка Серьезности ошибки (DNORM)
 - Предустановленные и регулируемые, пороги серьезности (пунктирная желтая линия)
 - Представлены зелеными или красными линиями
 - Направление линии связано со знаком изменения полного сопротивления
 - Несколько точек / повреждений / дефектов / изменений могут быть обнаружены при одном измерении
 - Изменения нормируются и компенсируются для затухания кабеля
- Подпись Симметричной Нагрузки (Balanced Termination Signature - BTS)
 - Обнаружение деградаций симметричной нагрузки

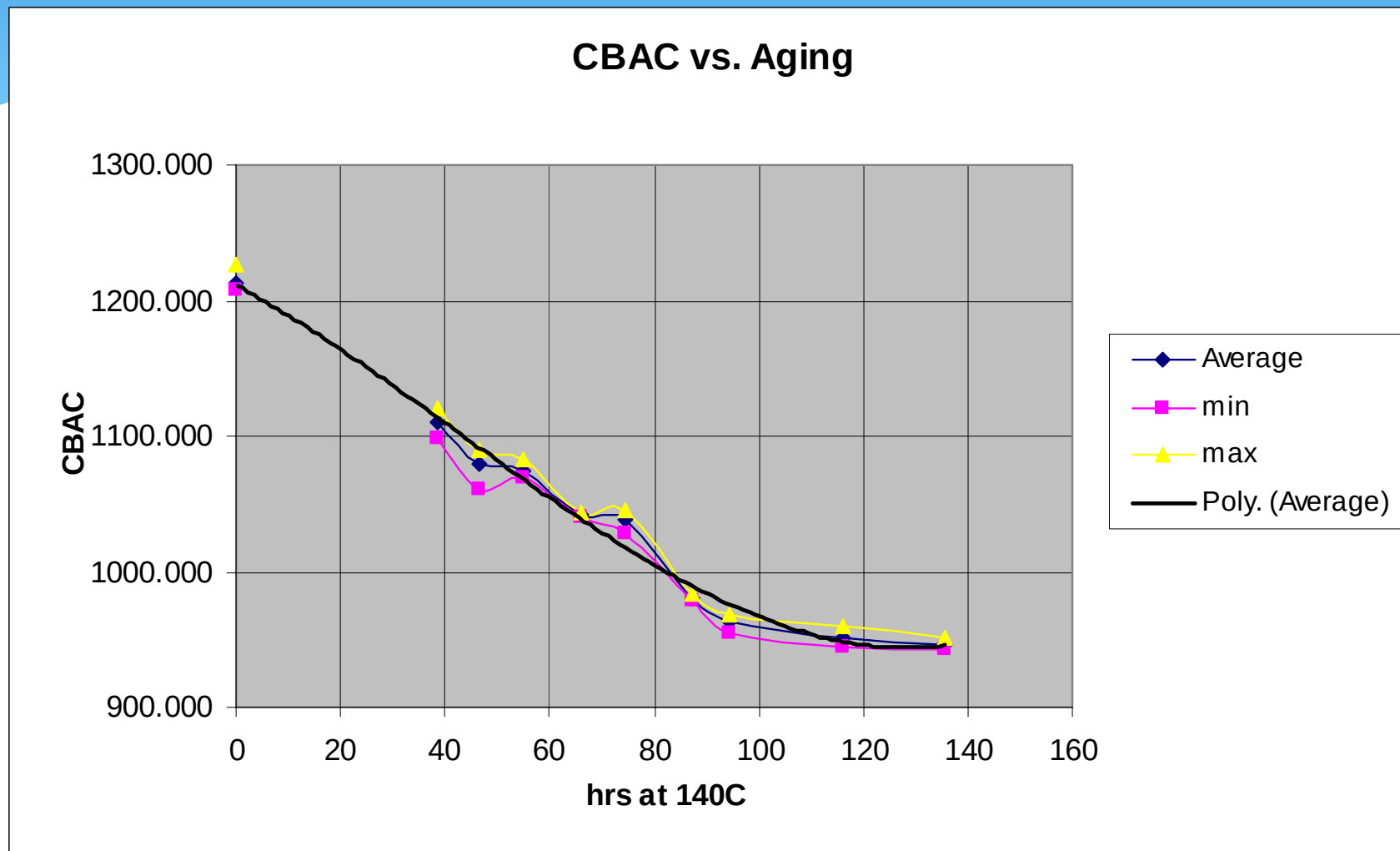


Точность локализации – измерено 20 кабелей



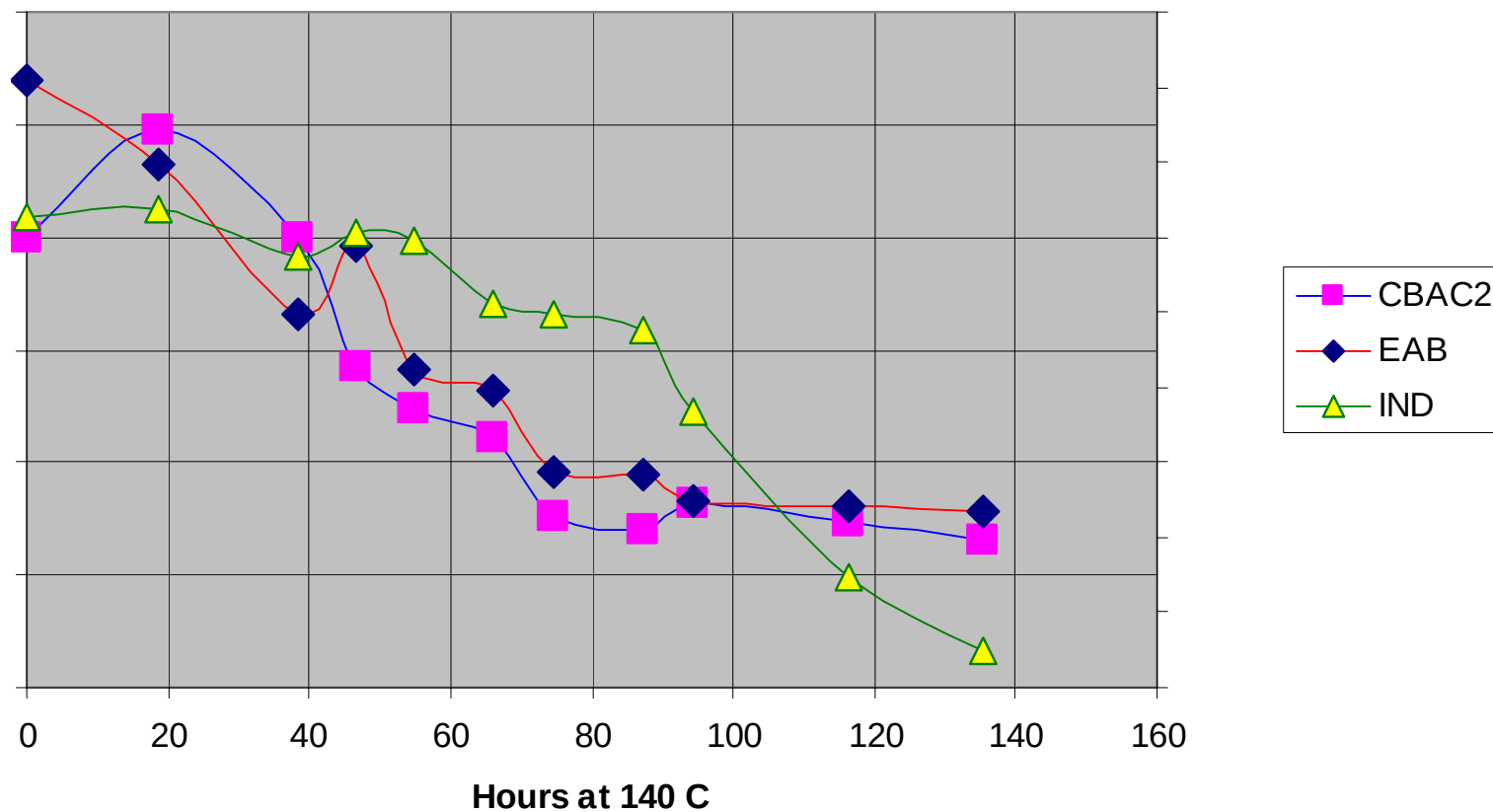
СРЕДНЯЯ ОШИБКА = 0.23 % от длины кабеля
СТАНДАРТНО = 0.08%

Старение СВАС - СКЭП изоляция (2009)



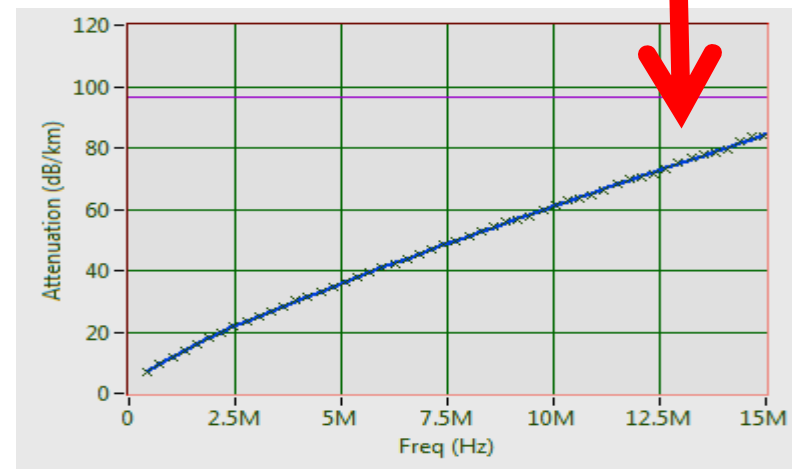
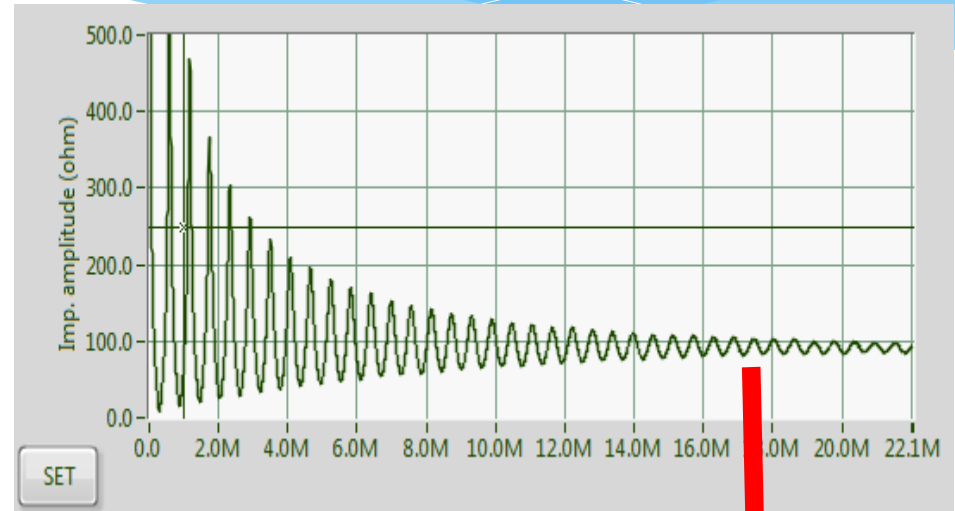
LIRA / EAB / Indenter - Малый размер, Воздух

CBAC2 - EAB - Indenter comparison, Small Air



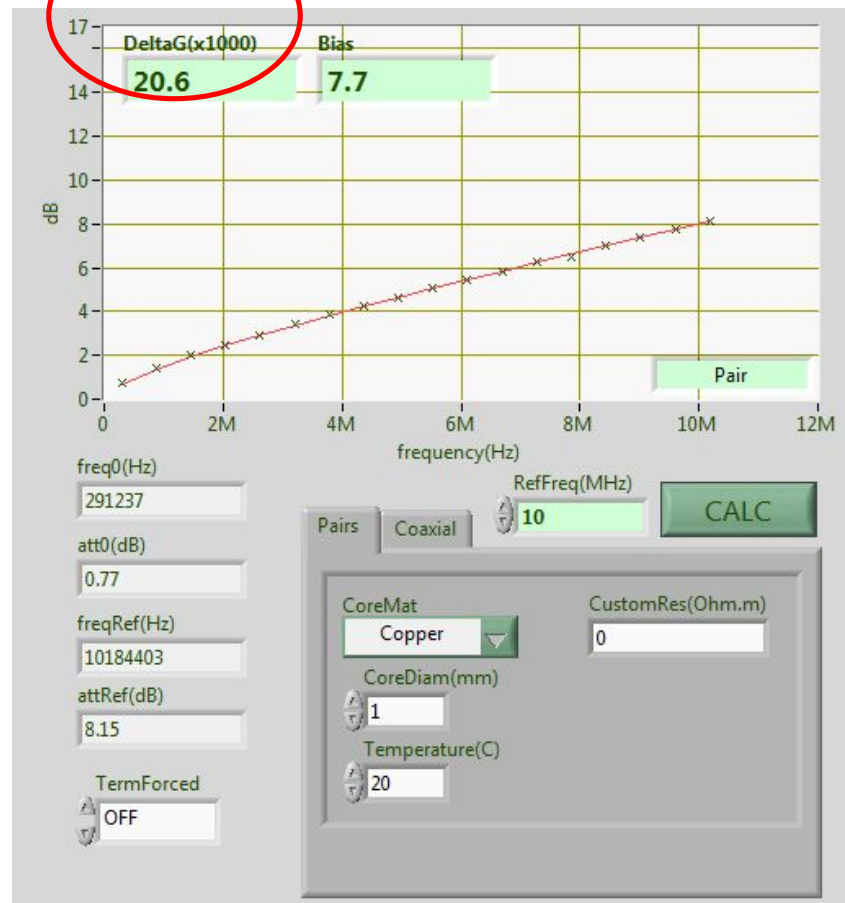
Глобальная Деградация (LIRA индикатор DeltaG) от СВАС до DeltaG

- Общий показатель старения DeltaG основыван на точной оценке спектра затухания в пределах приложенной полосы пропускания.
- Затухание является результатом воздействия 2-х факторов:
 - Сопротивление проводника (со скин-эффектом): K_1
 - Диэлектрические потери: $\alpha = K_1 \times \sqrt{f} + K_2 \times f$
- K_1 и K_2 можно точно оценить с использованием нелинейного алгоритма регрессии Левенберга-Марквардт
- K_1 не чувствителен к старению, в то время как K_2 увеличивается при деградации материала

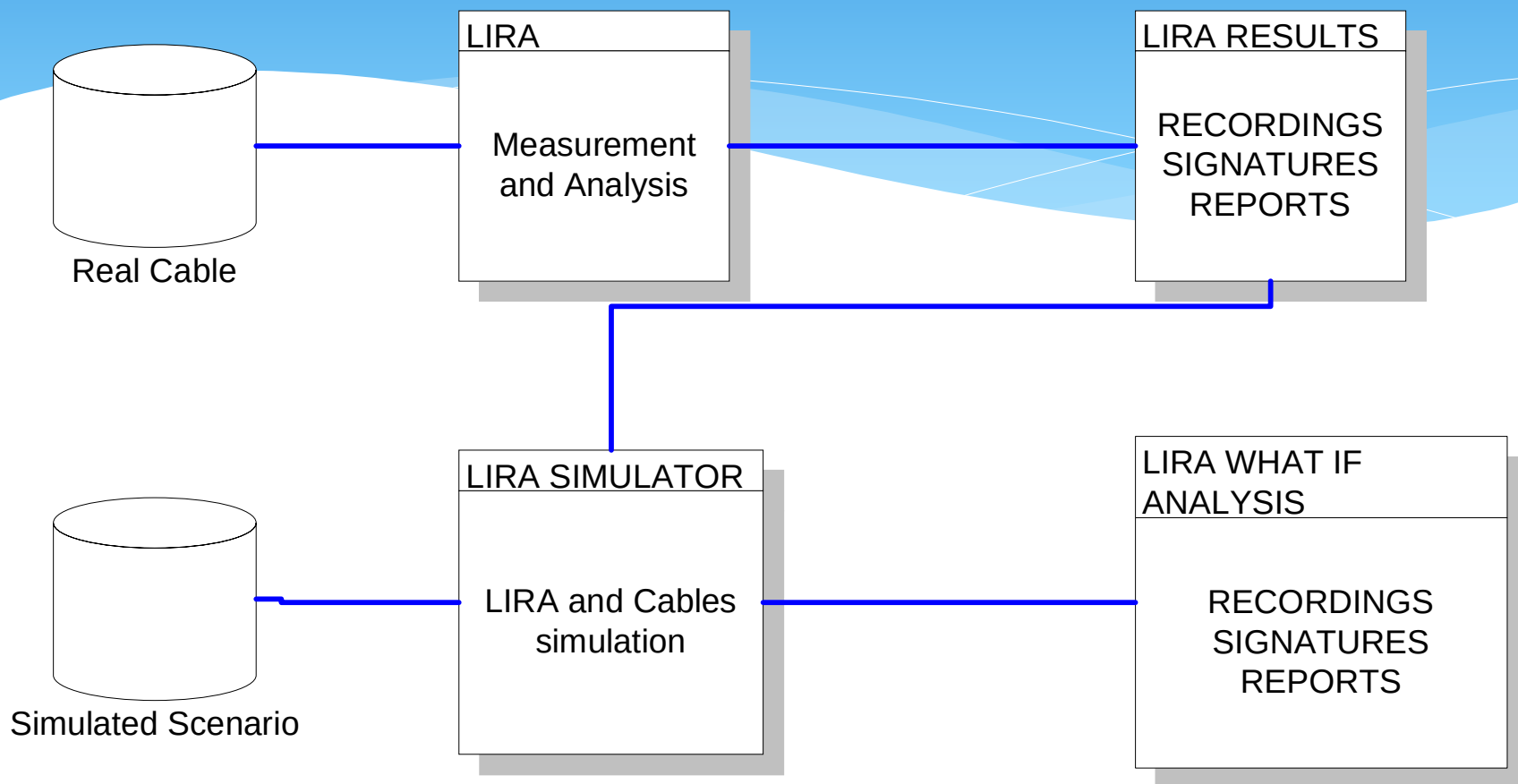


Глобальная Деградация (LIRA индикатор DeltaG) – Продолжение

- DeltaG является показателем диэлектрических потерь, что эквивалентно тангенсу угла потерь.
- Он рассчитывается с использованием оцененного ослабления через всю приложенную полосу частот.
- Для расчета DeltaG, необходима следующая информация о кабеле:
 - Материал активной зоны (и покрытия)
 - Диаметр активной зоны (и покрытия)
 - Температура



Анализатор вариантов с модулятором LIRA



Диагностика компонентов в LIRA

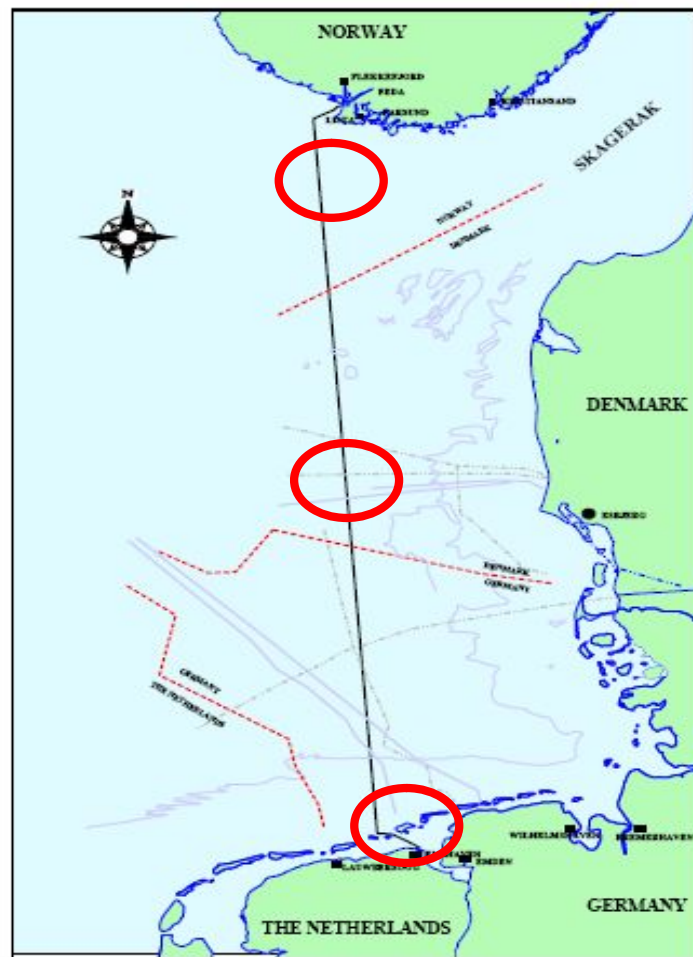
Как использовать LIRA для оценки состояния кабеля

- Общие электрические параметры: Z_0 , V_R , C , L , Att
 - Все они, имеют ожидаемое значение, которое может измениться с деградацией
- Подпись кабеля и график DNORM
 - Для обнаружения локальных дефектов, чувствительных к локальным изменениям полного сопротивления кабеля
- Анализ тенденций подписей
 - Во времени или пространстве
- Глобальный индикатор DeltaG
- Анализ состояния нагрузки с BTS

NorNed, 580 км высоковольтный кабель постоянного тока (HVDC). 2007

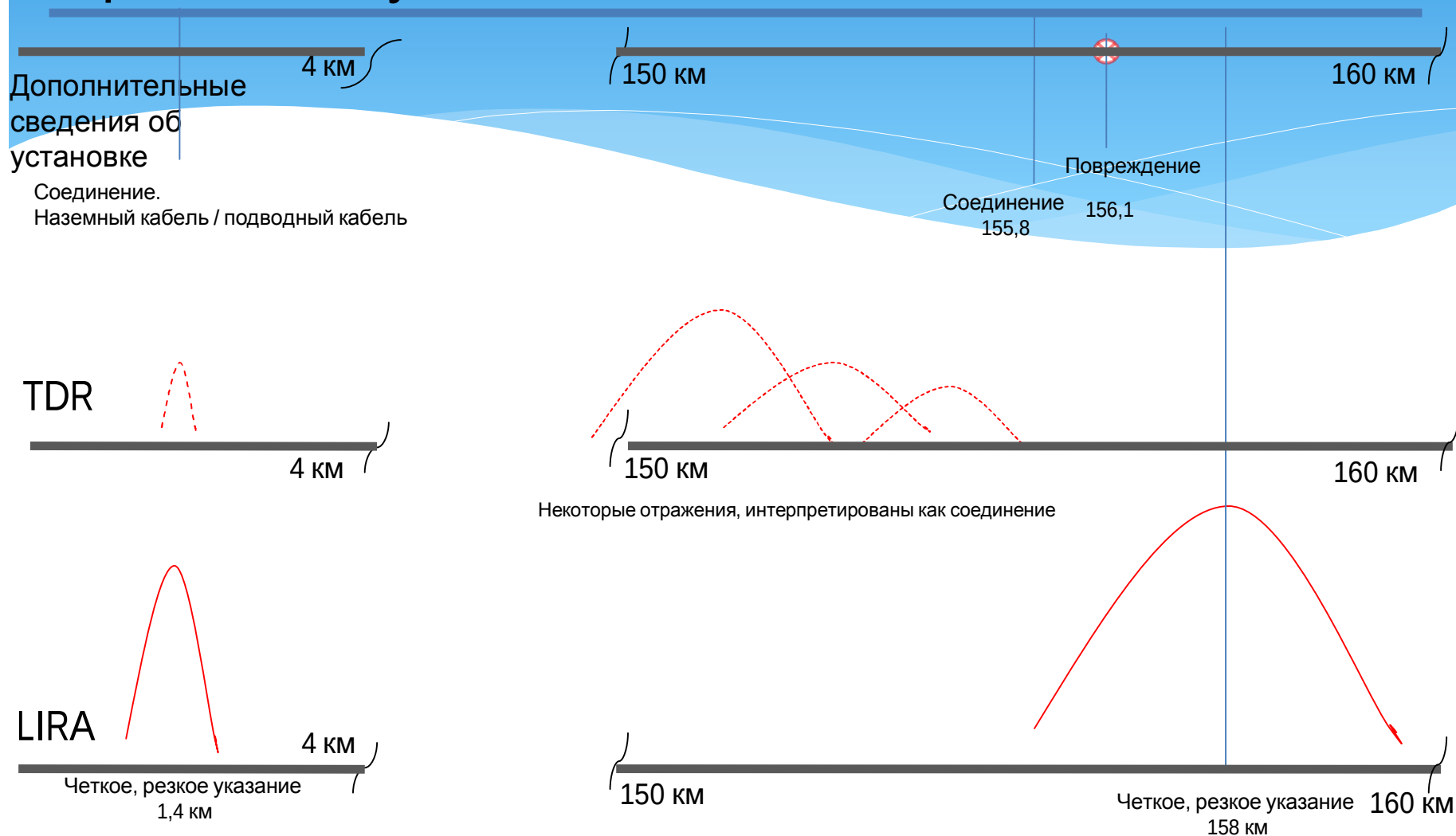
Бумажная изоляция, +/- 450 кВ HVDC кабель между Норвегией и Голландией.

- Оценка серьезности возможных дефектов после повреждений во время установки в зоне выхода на сушу
- Локализация повреждения с точностью лучше, чем 0,4% от общей измеренной длины.



Source; Statnett

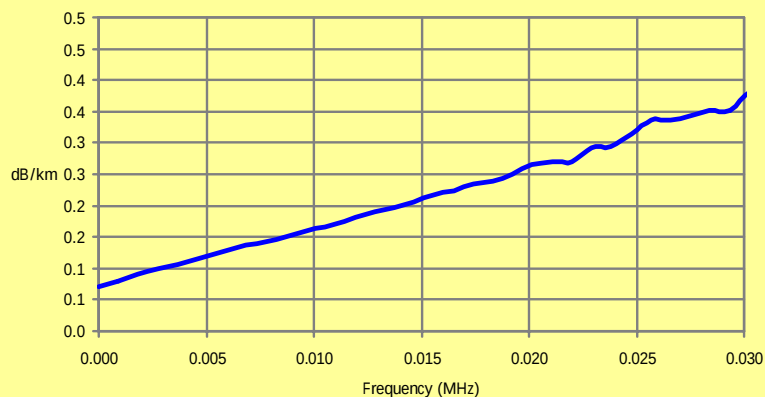
NorNed кабель, локализация дефекта. Визуализация поиска - TDR и LIRA



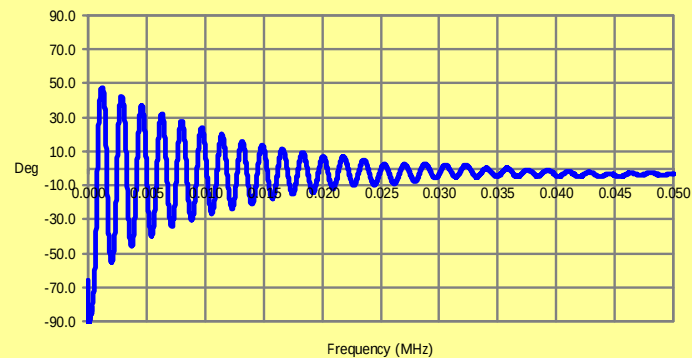
LIRA испытания HVDC кабелей, длина 42 км, в Новой Зеландии

Испытания LIRA были проведены в Веллингтоне (Новая Зеландия) в марте 2011 года на трех кабелях постоянного тока 350 кВ, 1400 мм², длиной 42 км, соединяющих Северный остров (Oteranga Bay) и Южный остров (Fighting Bay). Эти испытания были проведены в сотрудничестве с новозеландскими подразделениями Siemens и Transpower, во время отключения кабелей для периодического технического обслуживания.

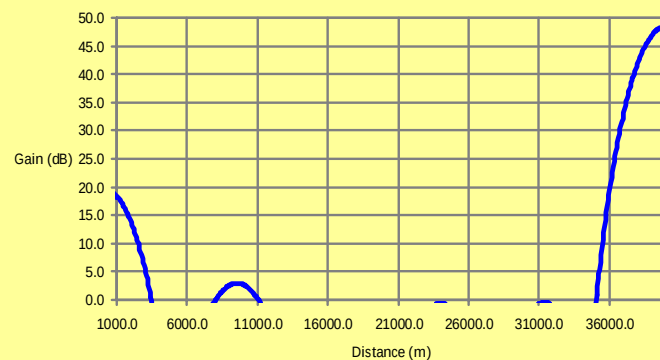
Cable Attenuation



Impedance Phase Spectrum

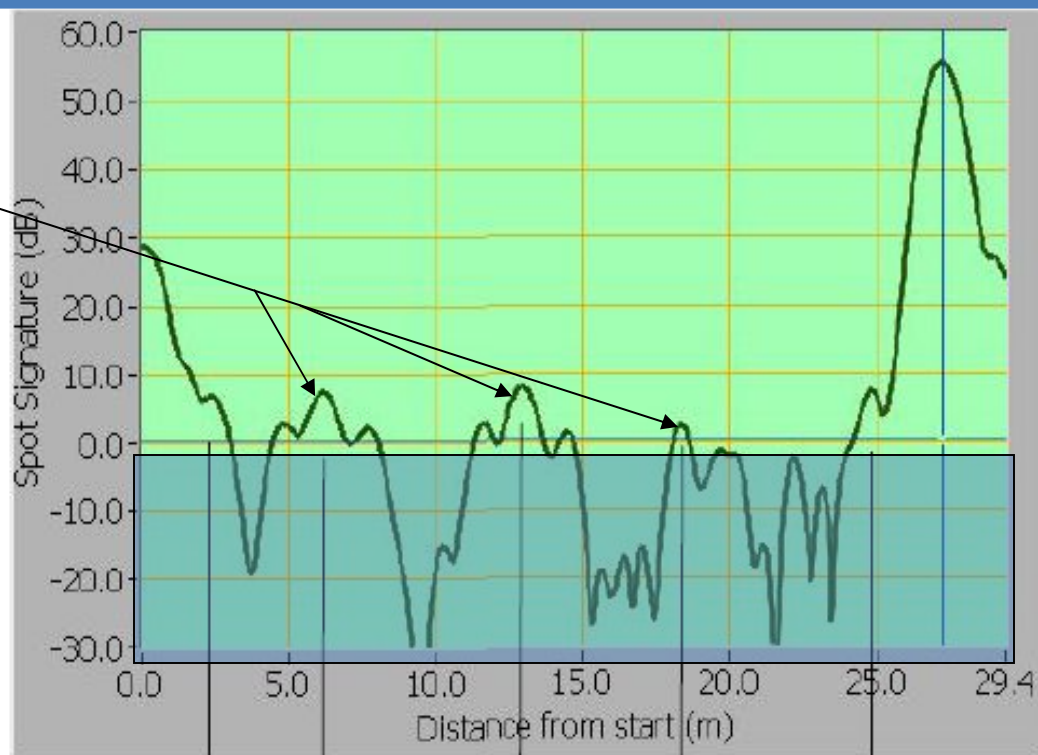


Abs. Spot Signature



LIRA обнаружение водяных деревьев на среднем напряжении на кабеле из сшитого полиэтилена (ПЭ-С) (Electric Power Research Institute - EPRI)

Водяной триинг

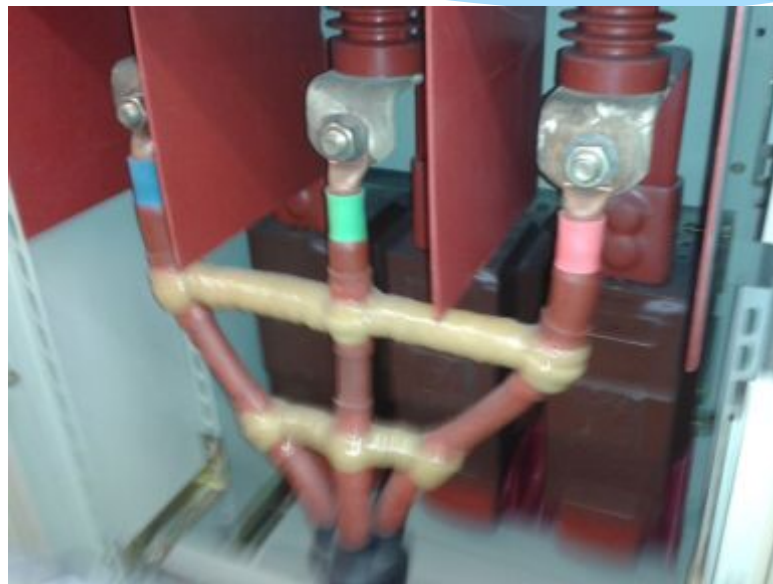


Испытательное напряжение пробоя

Испытание Угла
Потерь

LIRA Spots m	2.4 m	6.5m	13.1 m	18 m	24.7				
CTL m	0.25	2 m	5.2m	7.9 8.4	10.5	12.5	15.7	19.6	22.9 m
CTL ft	9 in	6 ft 6 ft	24	25.5 ft	32 or 38	48 or 60	70 ft		
BDxVo	Fail	4.6	5.2	7.1	7.1	7.1	5.2		
Tan δ(10 ⁻³)	-	200	74	50	29	29	37		

MV Розовый ЭПР 10кВ, 30 лет



ЭПР - эластомерный сополимер этилена и пропилена

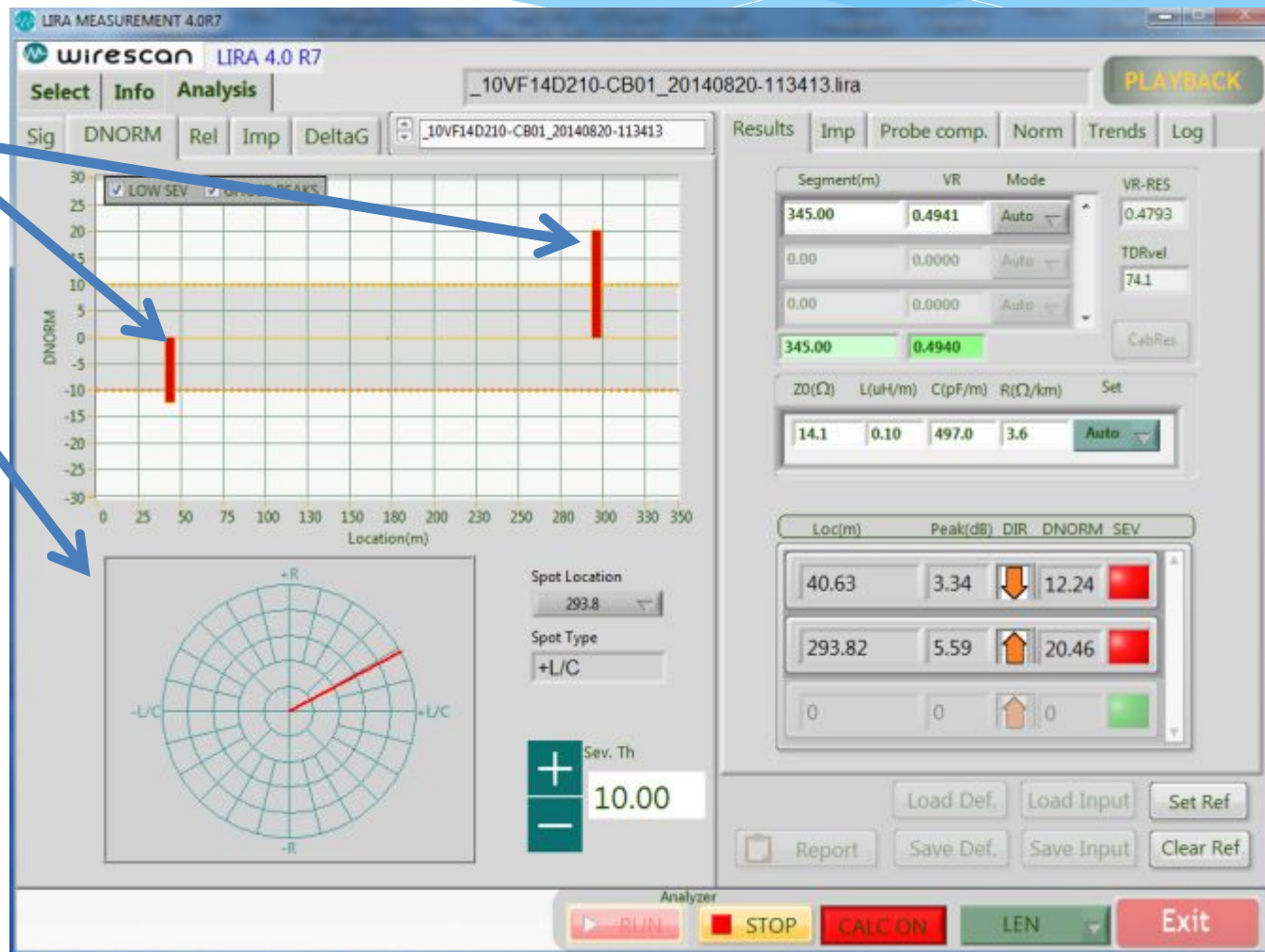
3 фазы 10кВ подземный экранированный кабель, длиной 345 м длиной к Вспомогательному Водяному Насосу.

В эксплуатации с 1983

MV Розовый ЭПР 10кВ, 30 лет

Локальные
точки

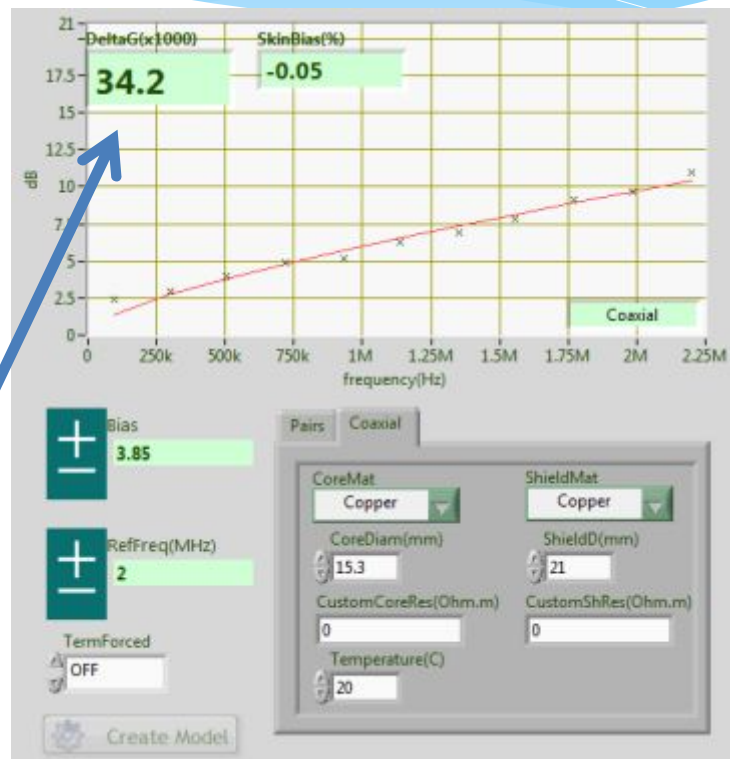
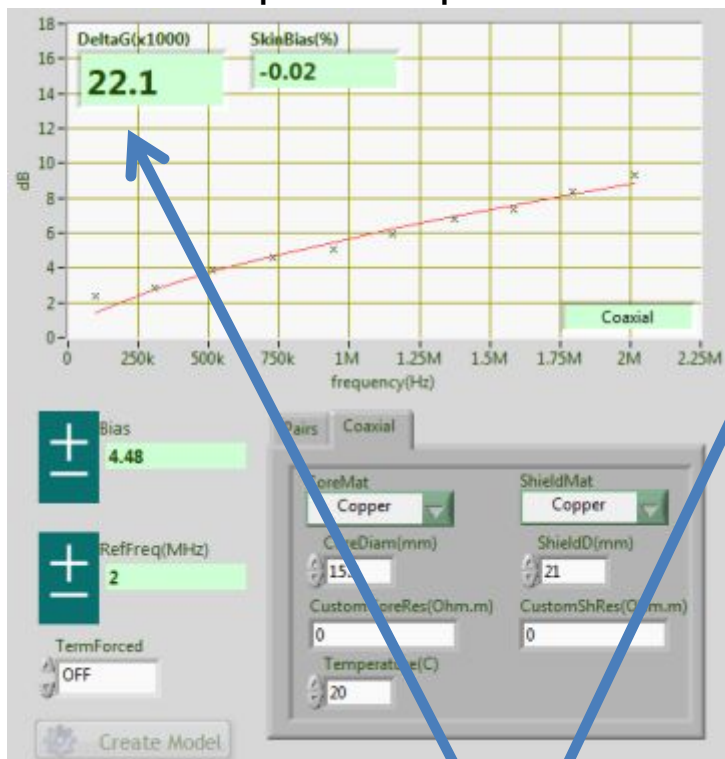
Анализ полного
сопротивления
точки



MV Розовый ЭПР 10кВ, 30 лет

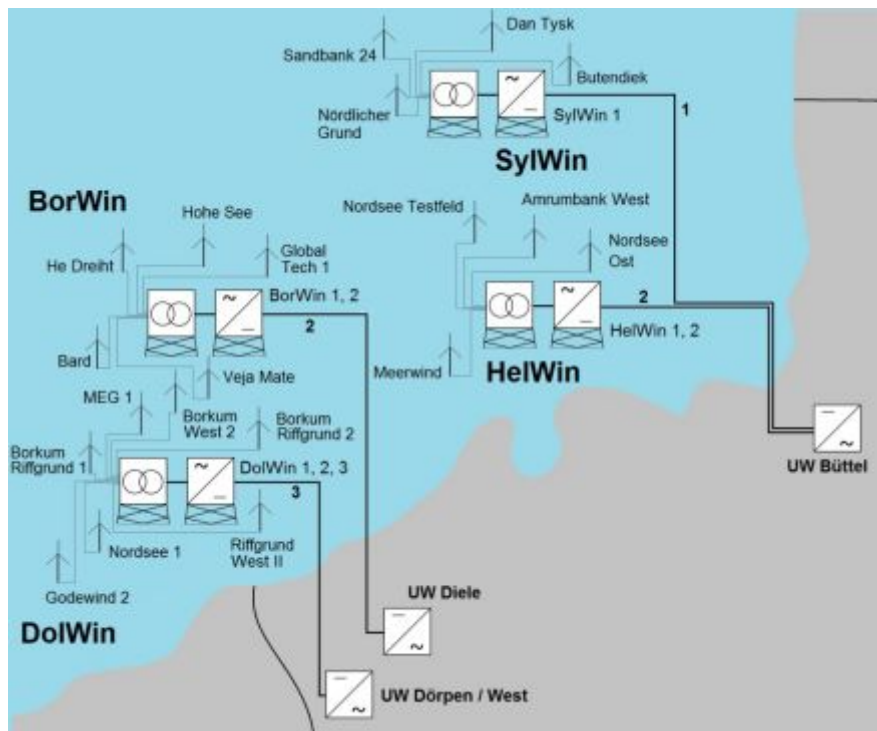
Красная фаза

Голубая фаза

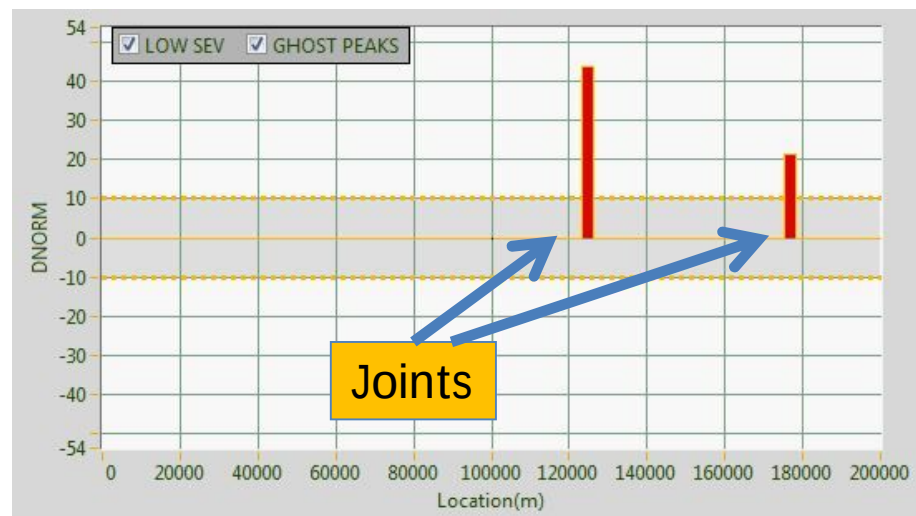
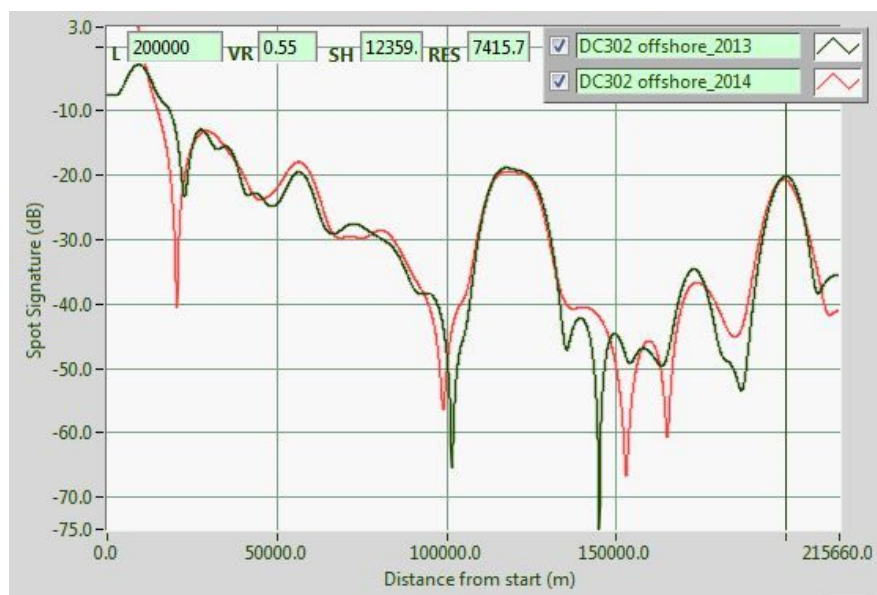


Коэффициент рассеяния (Delta G)

Подводные высоковольтные кабели постоянного тока, 150 кВ



Анализ тенденции изменения показателей



Спасибо за внимание!