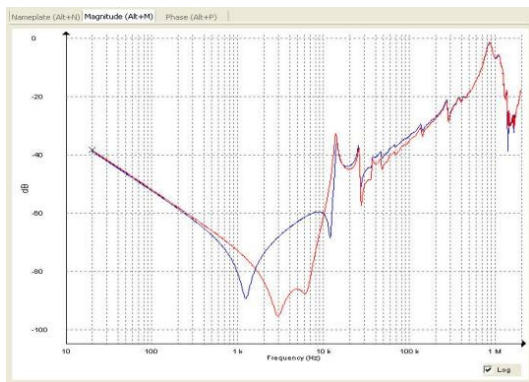


# Дефекты механической части трансформаторов.

## Анализ частотных характеристик (SFRA)



**Дробышевский А.А.**  
НТЦ электроэнергетики  
[drobyshevskiy@ntc-power.ru](mailto:drobyshevskiy@ntc-power.ru)

**Дробышевский С.А.**  
Энергоскан  
[dsa@energосkan.ru](mailto:dsa@energосkan.ru)

# Откуда ждать проблемы?

- *Конструкция*
- *Производство*
- *Транспортировка*
- *Обслуживание*
- *Старение*

# *Конструкция?*

**Неверно  
рассчитана  
прессующая  
конструкция?**



# *Производство?*



**Недостаточная  
плотность  
намотки?**

# ***Транспортировка?***





# *Старение?*



# **Механические деформации как дефект трансформатора:**

- ◆ Механические деформации имеют необратимый характер**
- ◆ Возможно только радикальное лечение - замена поврежденной обмотки**
- ◆ Стоимость ремонта может быть соизмерима со стоимостью нового трансформатора**



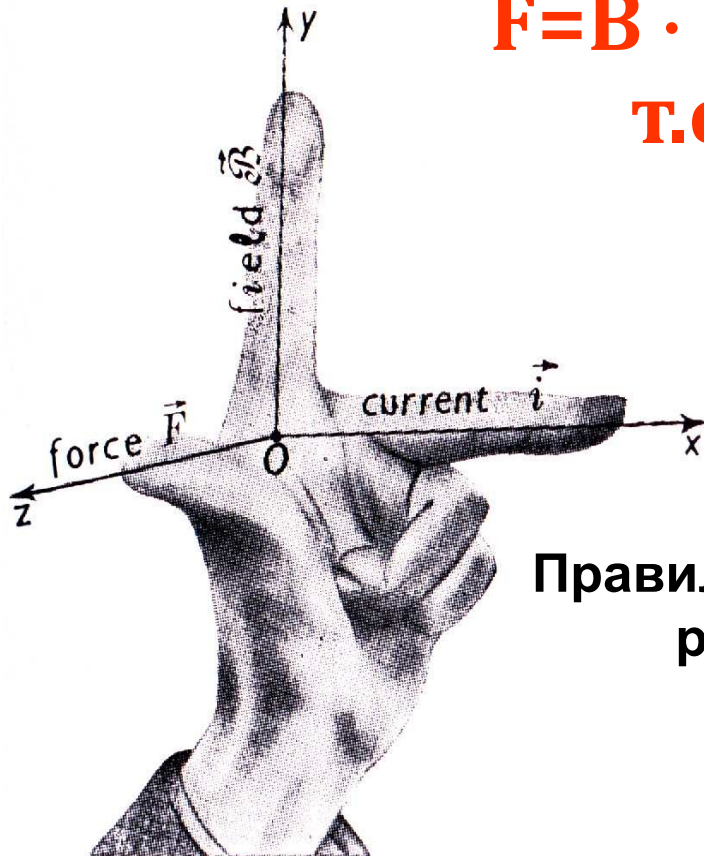
# **Формы и виды механических деформаций**

# Направление электродинамических сил

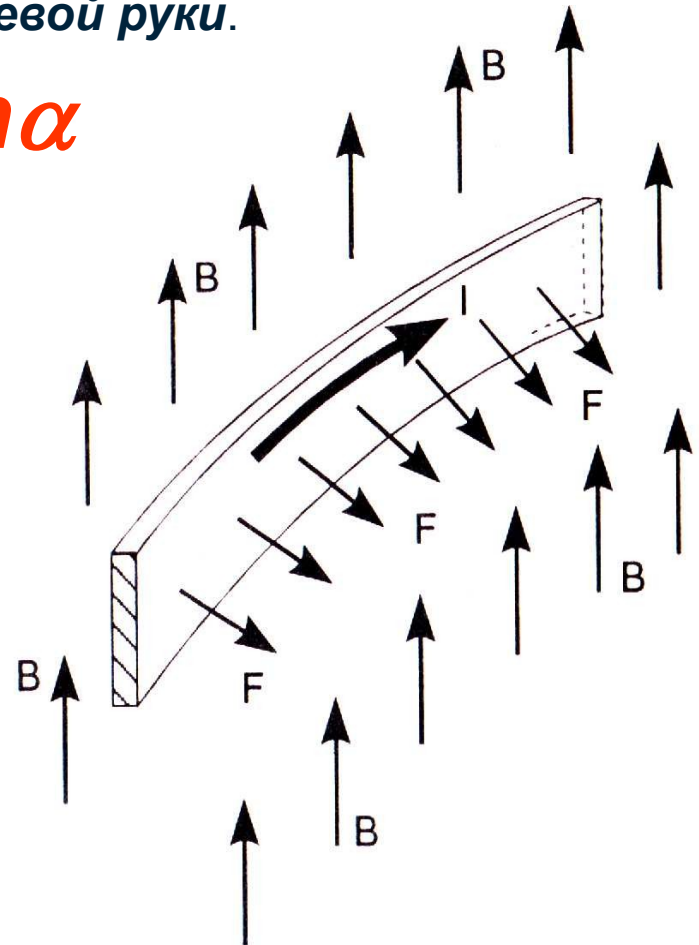
Известно, что на проводник с током, помещенный в магнитное поле, действует сила, стремящаяся сместить проводник. Эта сила, называемая электромагнитной, является результатом взаимодействия электрического тока и магнитного поля, и перпендикулярна к плоскости действия их векторов, направление силы определяется **правилом левой руки**.

$$F = B \cdot I \cdot l \cdot \sin \alpha$$

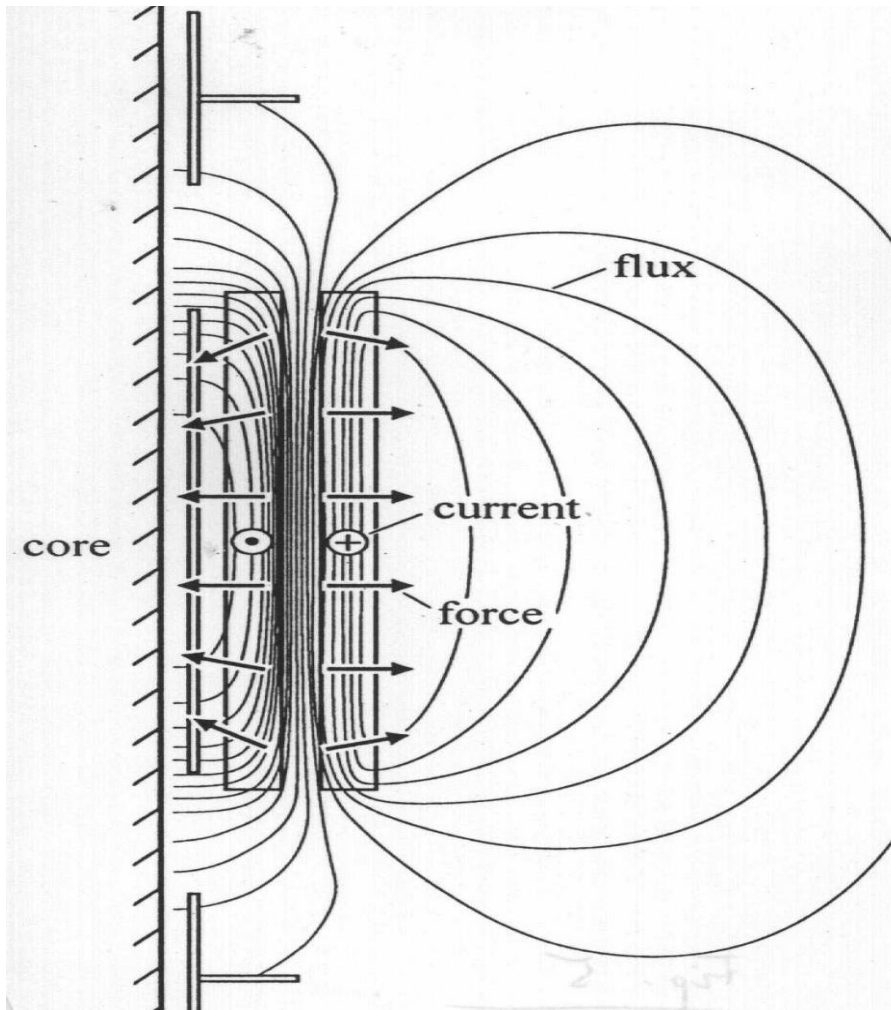
т.е.  $F \equiv I^2$



Правило левой  
руки

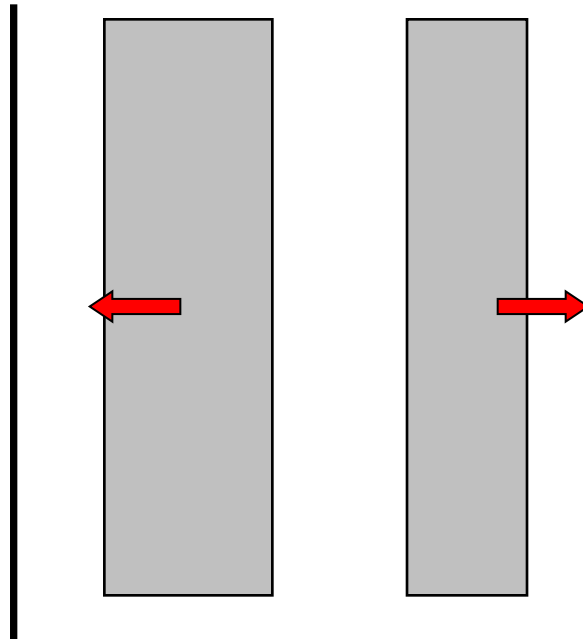


# Распределение магнитного поля рассеяния для 2х обм. трансформатора



- наибольшая плотность магнитных силовых линий – в пространстве между обмотками низкого и высокого напряжения, то есть, в главном канале, который называется еще **каналом рассеяния**,
- поле прямолинейно; изгибы силовых линий только на концах обмоток,
- По всей высоте действуют радиальные силы, и лишь у торцев – осевые

# Действие радиальных сил



**-Внешняя обмотка растягивается.** Прочность определяется пределом текучести материала  $\sigma_{0,2}$ .

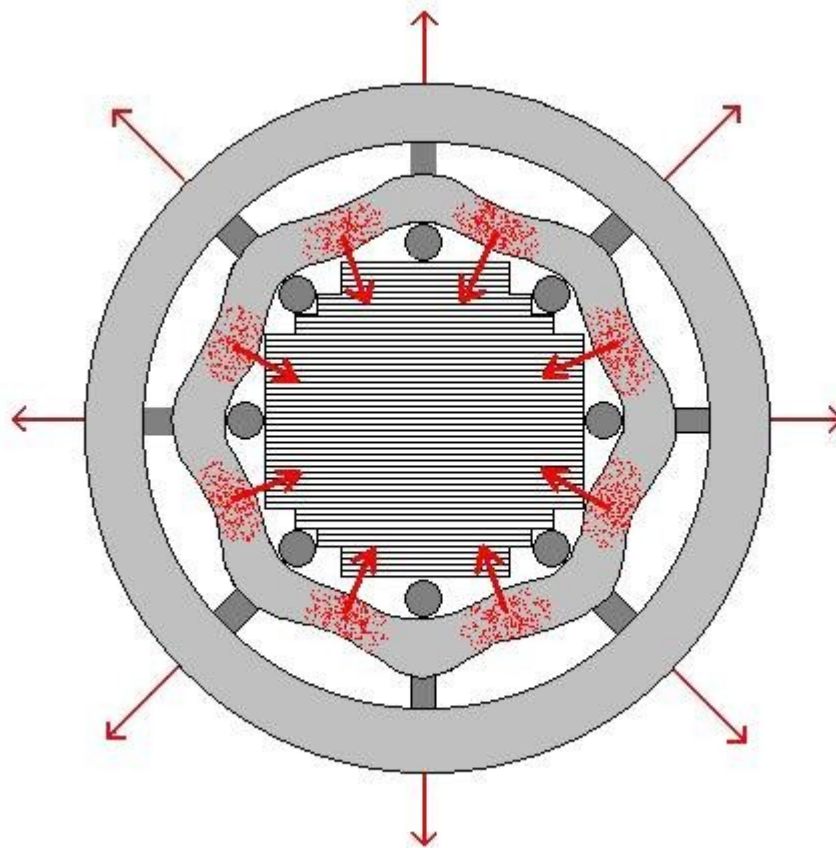
**-Внутренняя обмотка сжимается.** Стойкость к воздействию определяется модулем упругости материалов

# Повреждения растягиваемых обмоток (ВН, РО):

1. Механические напряжения в проводниках редко превышают предел текучести материала;
2. Изоляции проводника может потрескаться, разорваться;
3. Возможна потеря осевой устойчивости катушки из-за локального выпучивания в пролетах между столбами прокладок.

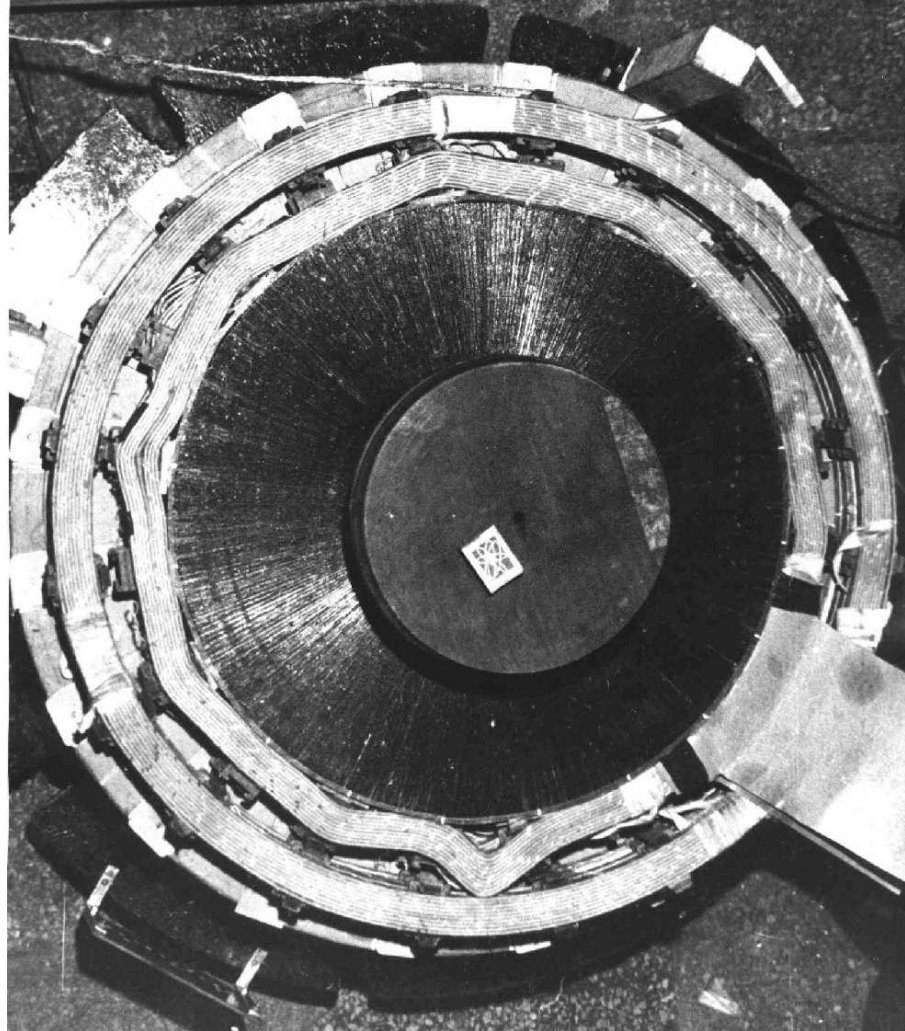
# Повреждения сжимаемых обмоток

Потеря радиальной устойчивости  
в форме «звезда»

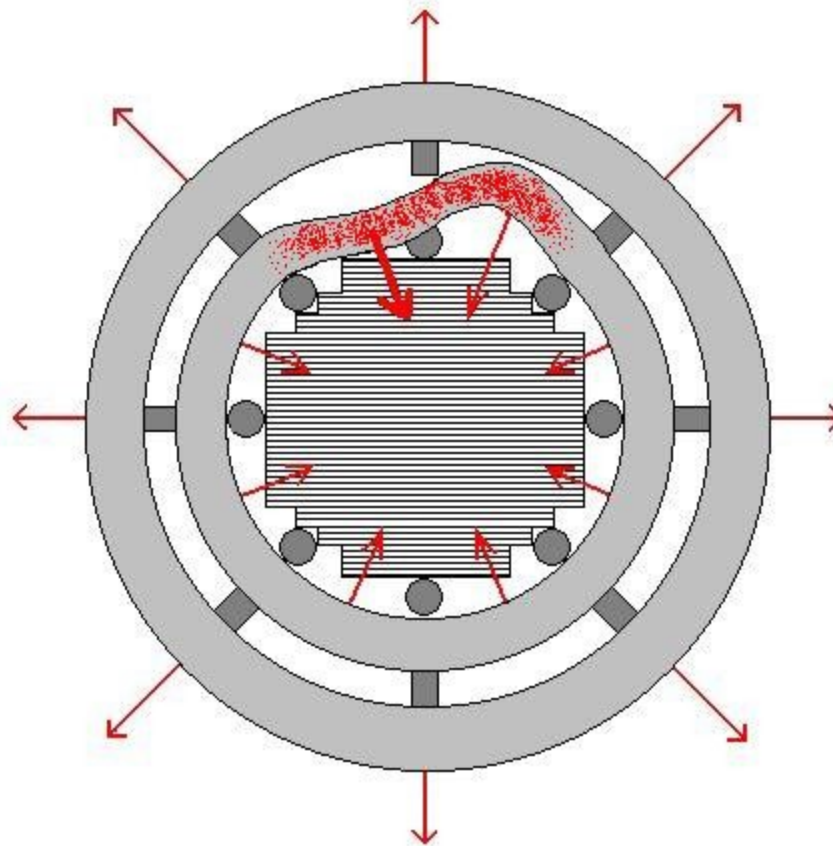


Внутренние опоры обладают достаточной прочностью.

# Пример потери радиальной устойчивости в форме «звезда»



# Потеря радиальной устойчивости в форме «волна»)



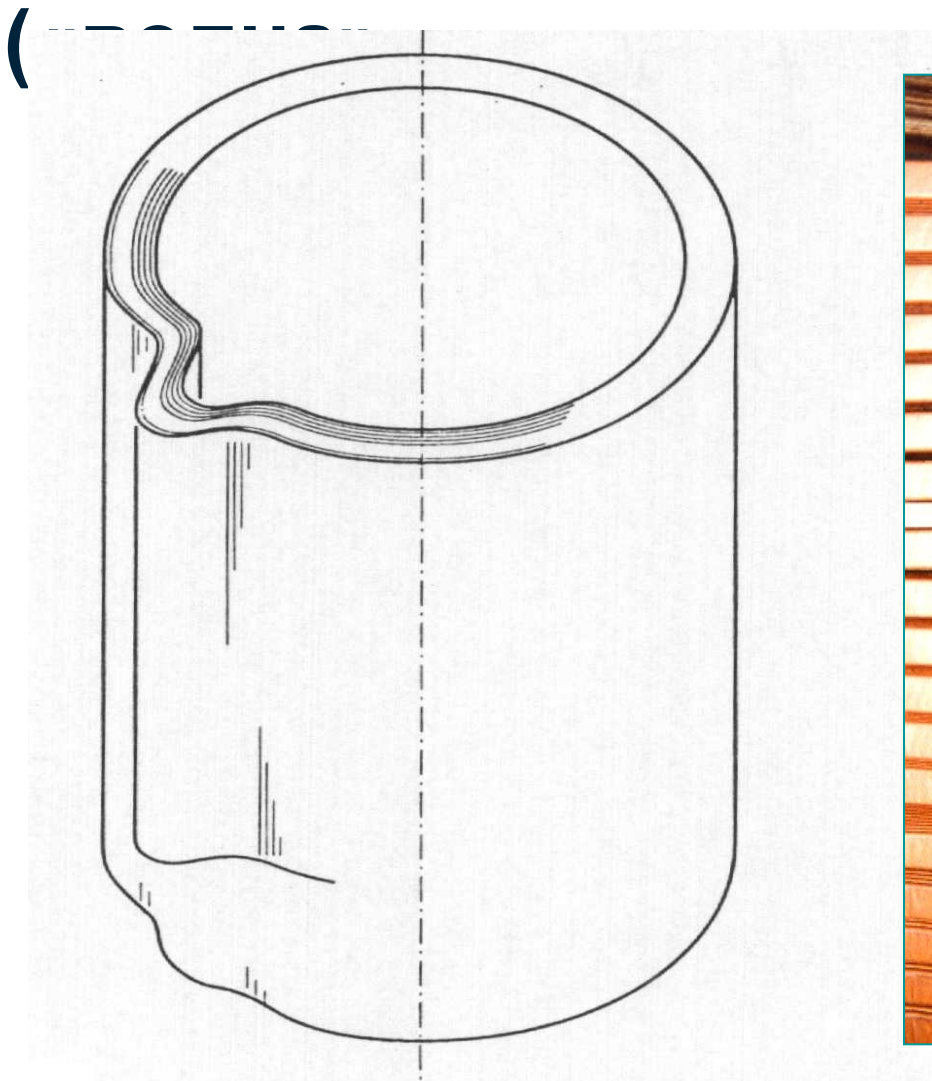
**Жесткость проводников превышает жесткость внутренних опор.**



# Пример потери радиальной устойчивости в форме «волна»

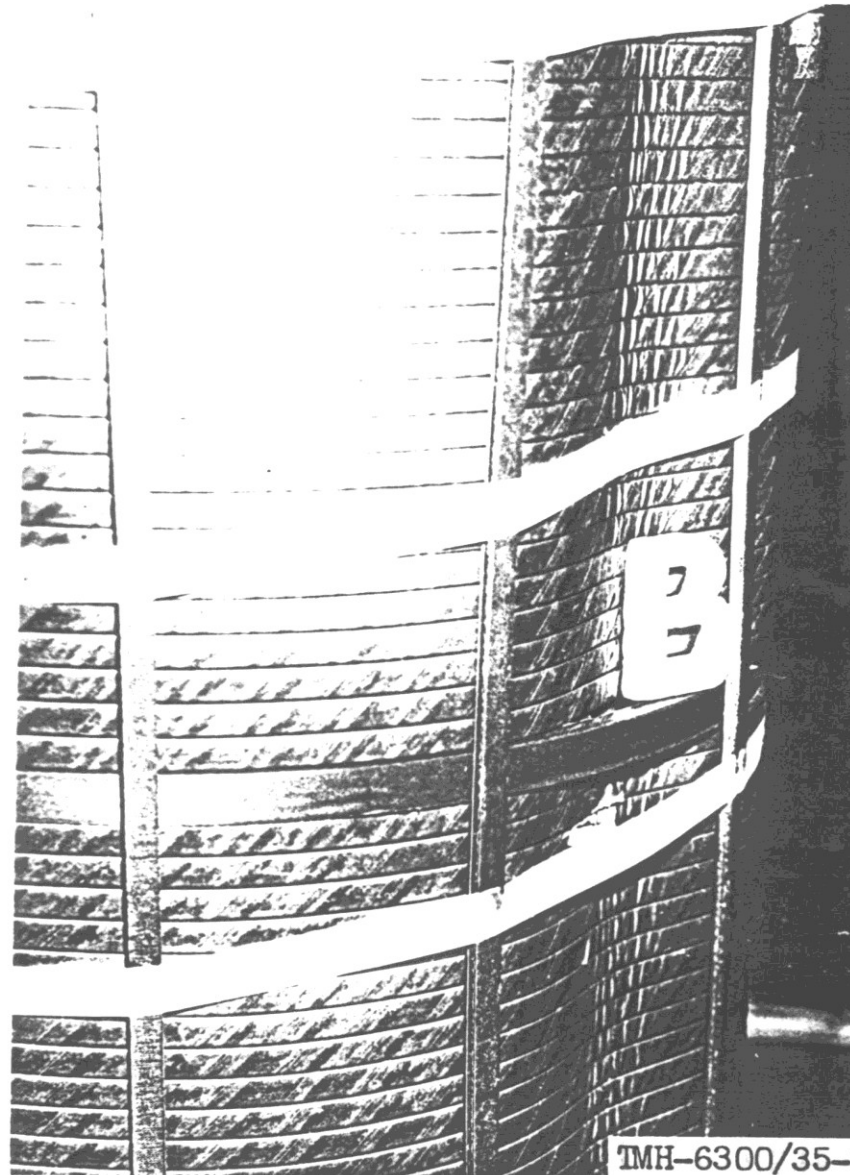


# Потеря радиальной устойчивости

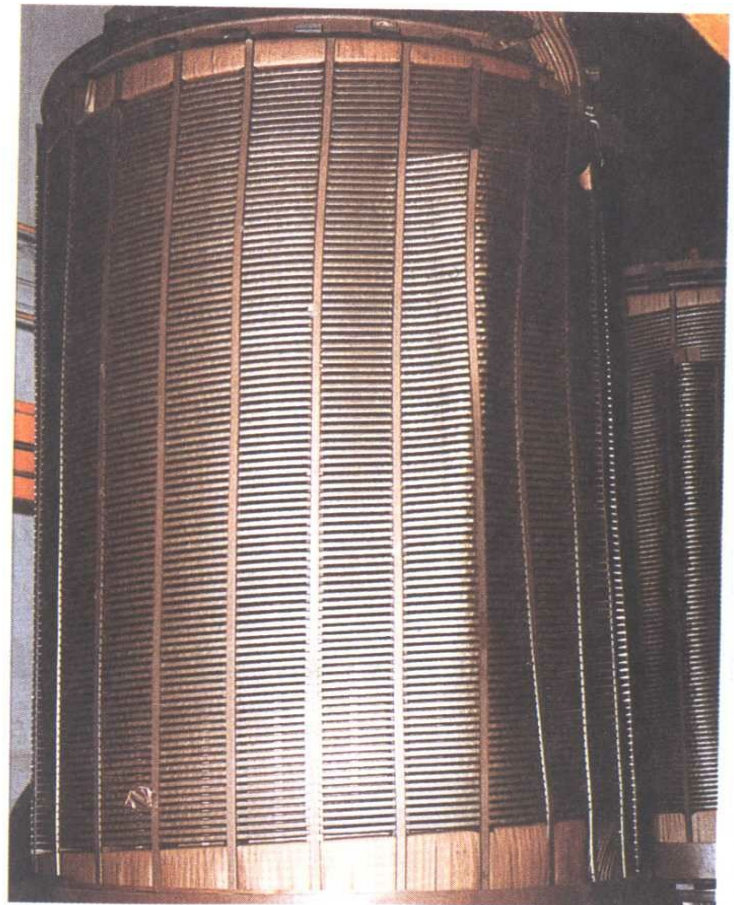


*Typical buckling pattern of an inner winding.*

# Другая фаза трансформатора ТМН-6300/35



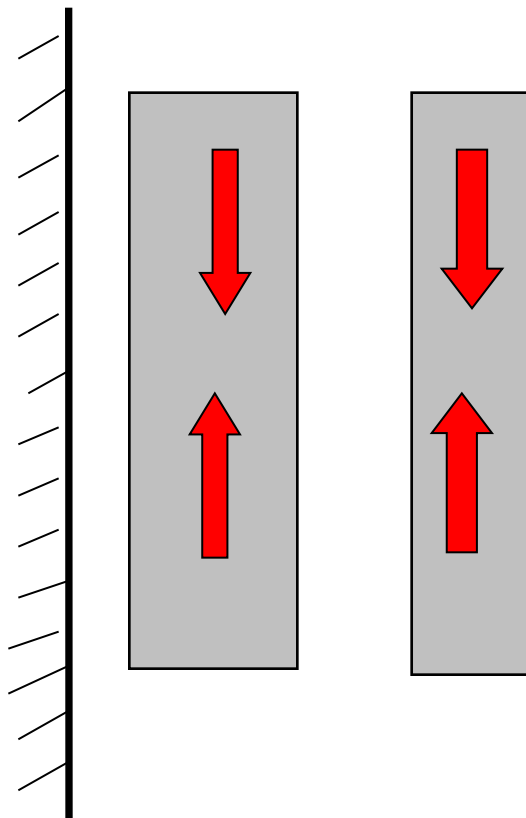
**... в более мощных трансформаторах:**





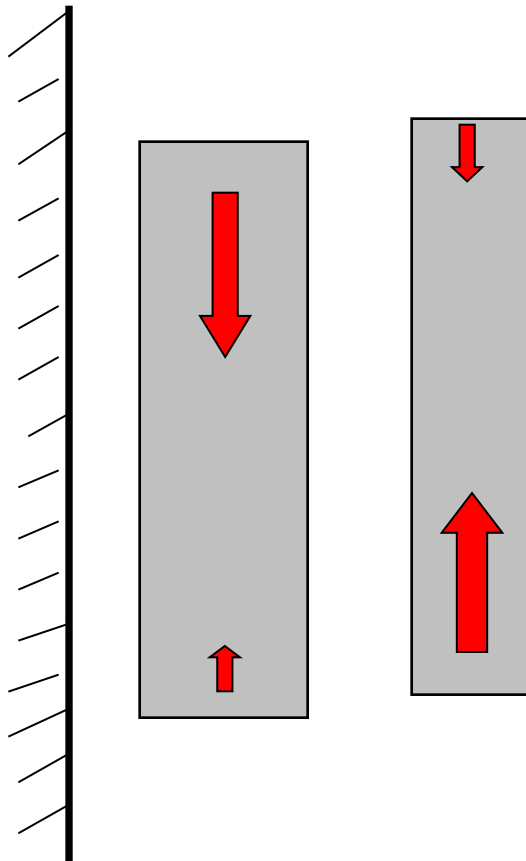
# Осевые силы.

## Сжатие обмоток под действием осевых сил



Обмотки магнитосимметричны.

# Осевой сжатие со взаимным смещением обмоток под действием осевых сил



Имеется начальная магнитная несимметрия.

**Магнитная несимметрия всегда стремится к своему увеличению**

# Пример повреждения из-за распрессовки и взаимного осевого смещения обмоток

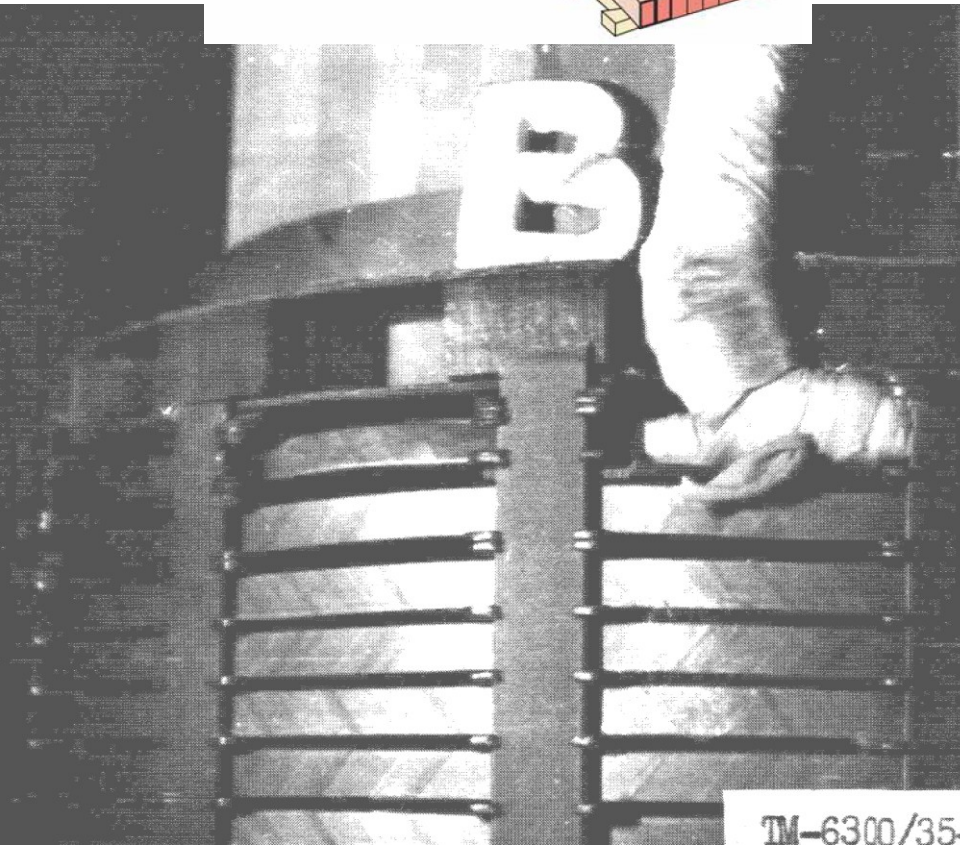
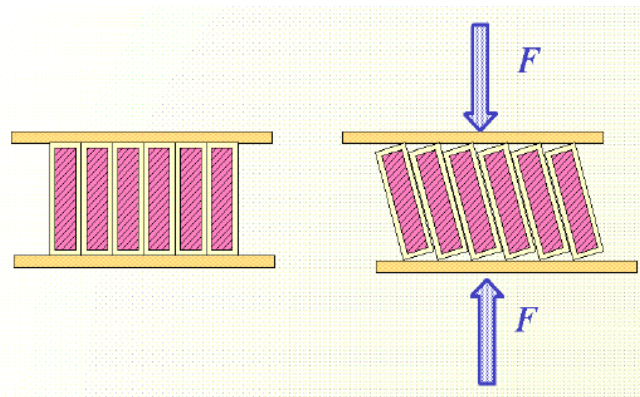
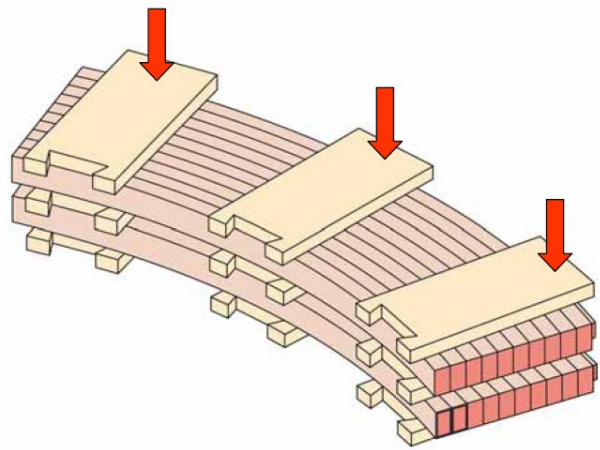




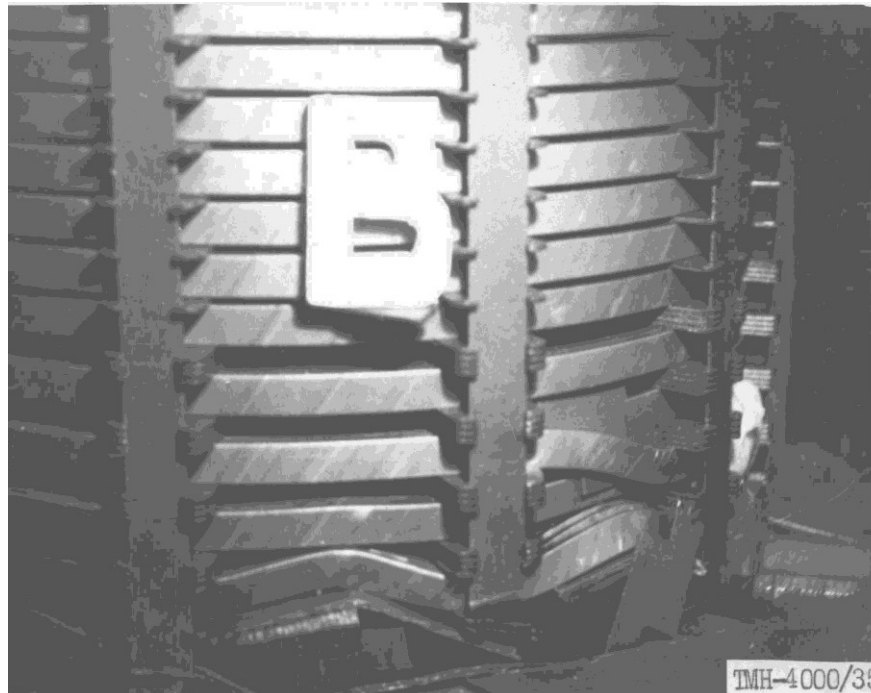
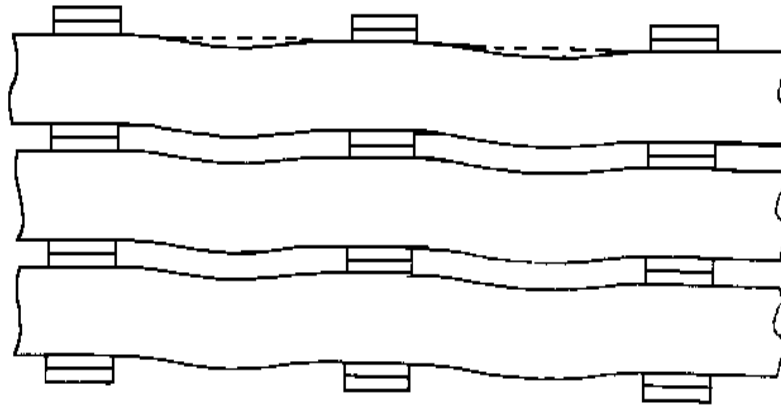


Coil displacement  
by 170mm of LV  
winding on HV  
winding side.  
Also observed  
black spot on  
disc no 1 & 7.

# Потеря осевой устойчивости

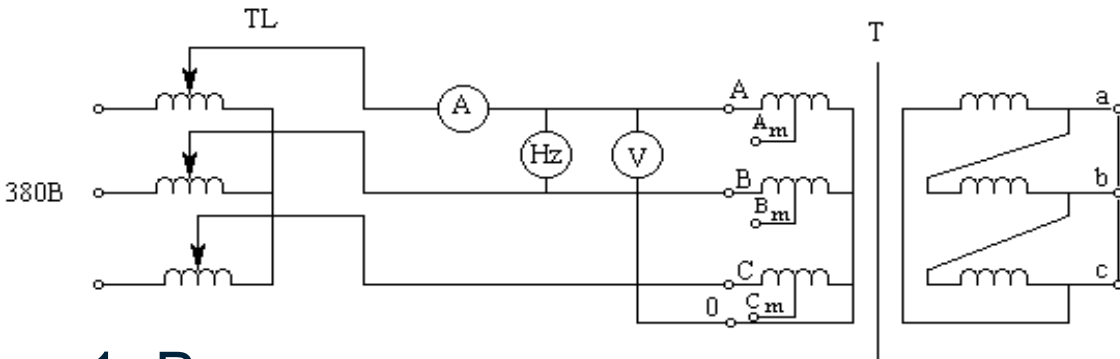


# Осевой изгиб проводников





# Стандартные испытания механического состояния. Проблемы испытания сопротивления КЗ



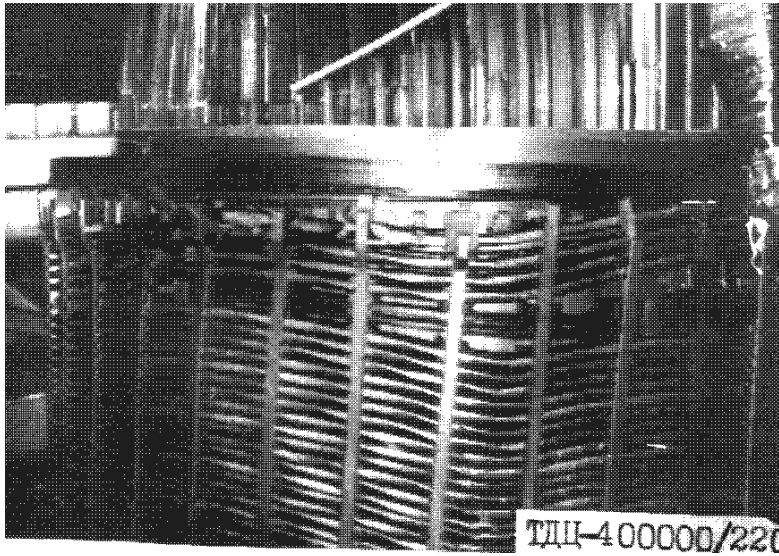
1. Воспроизводимость результатов.
2. Завышенные значения допустимых изменений.
3. Низкая чувствительность метода к некоторым видам деформаций.
4. Трудоемкость измерений.

# Допустимые изменения $Z_k$ при испытаниях на стойкость при КЗ

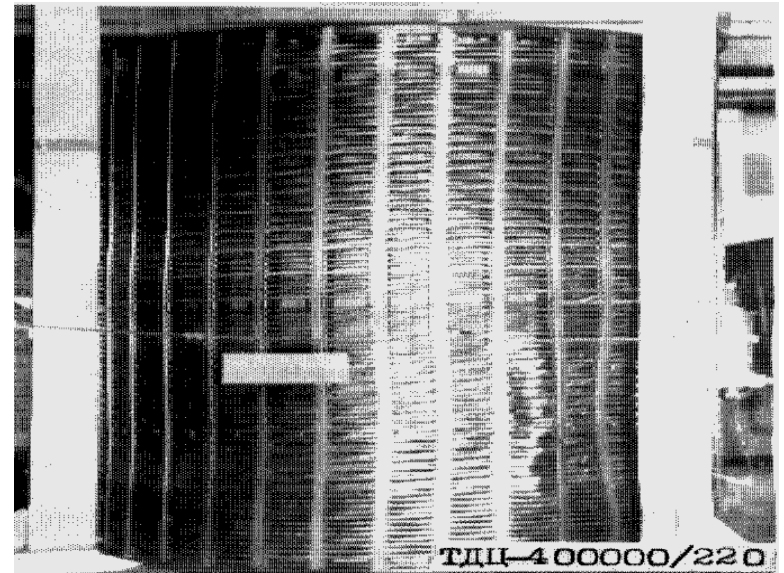
МЭК		ГОСТ20243-74	
До 100 МВА	$Z_k < 2\%$	До 1600 кВА	$Z_k < 1\%$ $1 < Z_k < 1,5$ – требуется разборка
Свыше 100 МВА	$Z_k < 1\%$ $1 < Z_k < 2$ – по соглашению	Свыше 1600 кВА	$Z_k < 1\%$

# Испытания на стойкость при КЗ

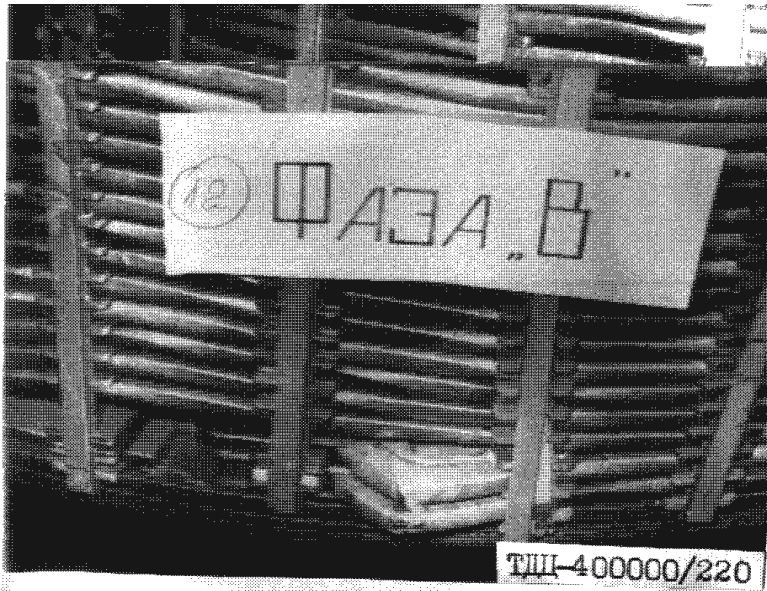
$\Delta Z_k=1,6\%$



$\Delta Z_k=0,95\%$

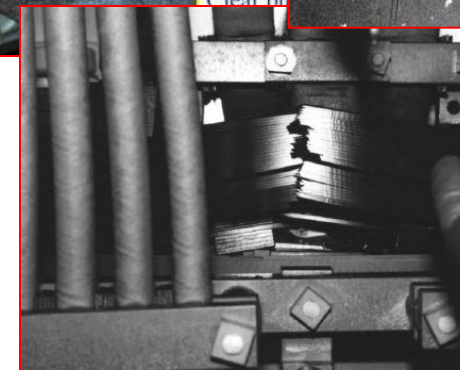


$\Delta Z_k=1\%$



# Международный опыт применения FRA доказал эффективность метода для обнаружения следующих дефектов:

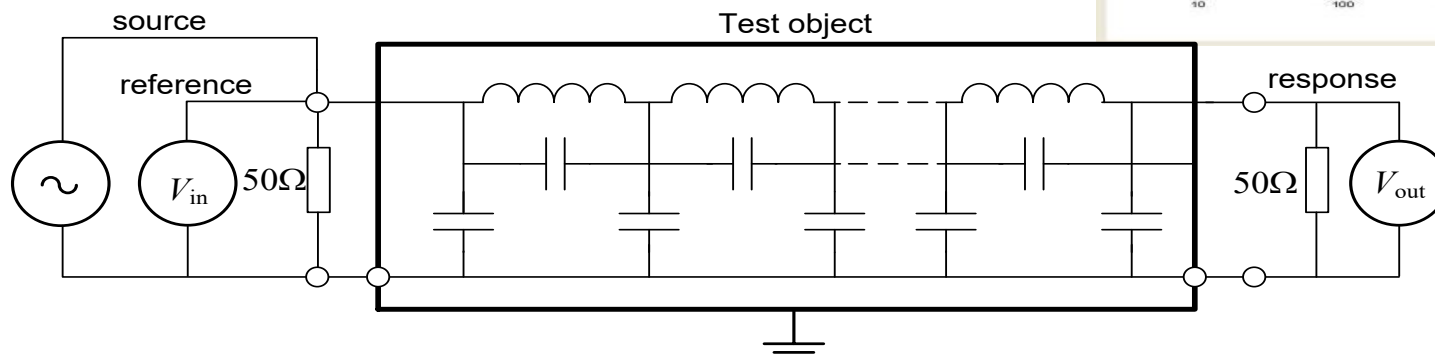
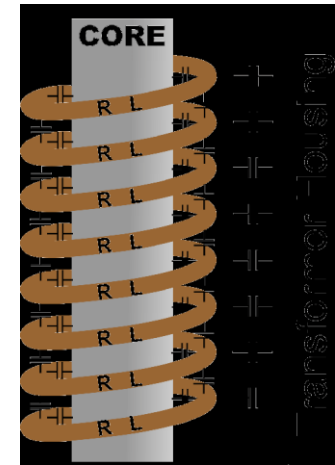
- Повреждения обмоток
  - Деформация
  - Смещение
  - Короткие замыкания
- Неисправности сердечника
  - Смещение
  - Заземление
  - Проблемы с экранированием
- Механические повреждения/изменения
  - Повреждения креплений
  - Соединения
- И не только...





# Основы тестирования SFRA

- Трансформатор рассматривается как схема комплексного импеданса
- Амплитудно-частотные характеристики измеряются в широком диапазоне частот и результаты измерения представляются в виде характеристической кривой
- Изменения в импедансе легко обнаруживаются. Их можно сравнивать во времени, и с другими объектами или частями объекта.
- Уникальная возможность определить разнообразные неисправности обмотки, сердечника и другие повреждения электрической цепи всего за одну проверку

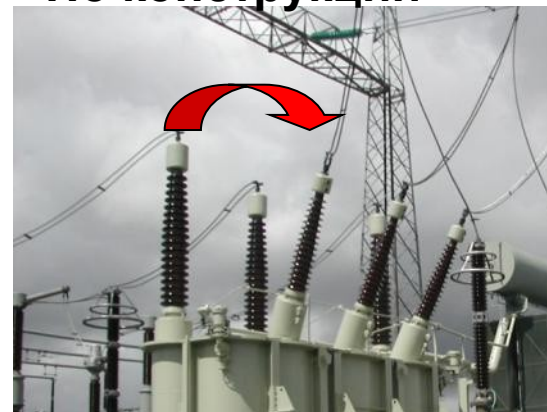


# SFRA - Сравнительные испытания

Трансформатор А



По конструкции



По времени



Трансформатор А



Трансформатор В



По типу

Основной принцип измерений SFRA

Новое измерение = контрольное измерение

Снова работает



Новое измерение  $\neq$  контрольное измерение

Необходима дальнейшая диагностика



# Сложности интерпретации

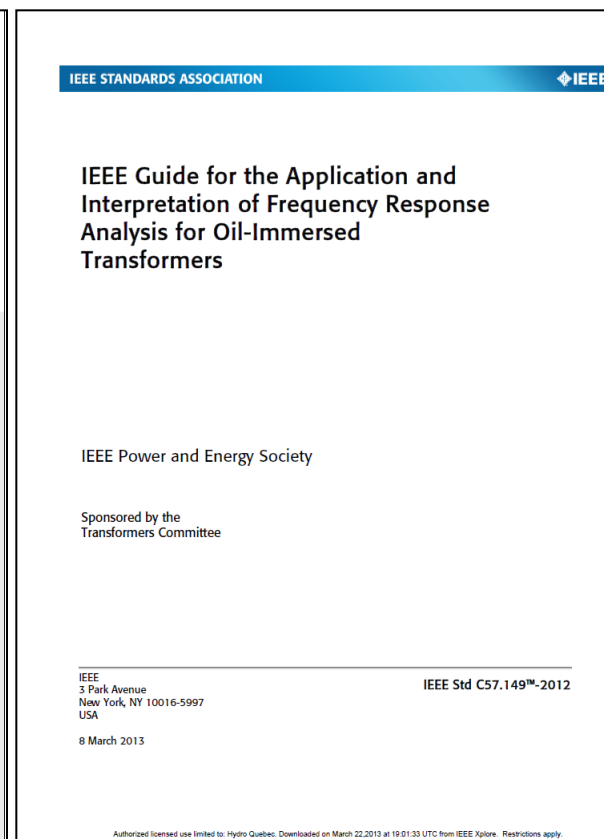
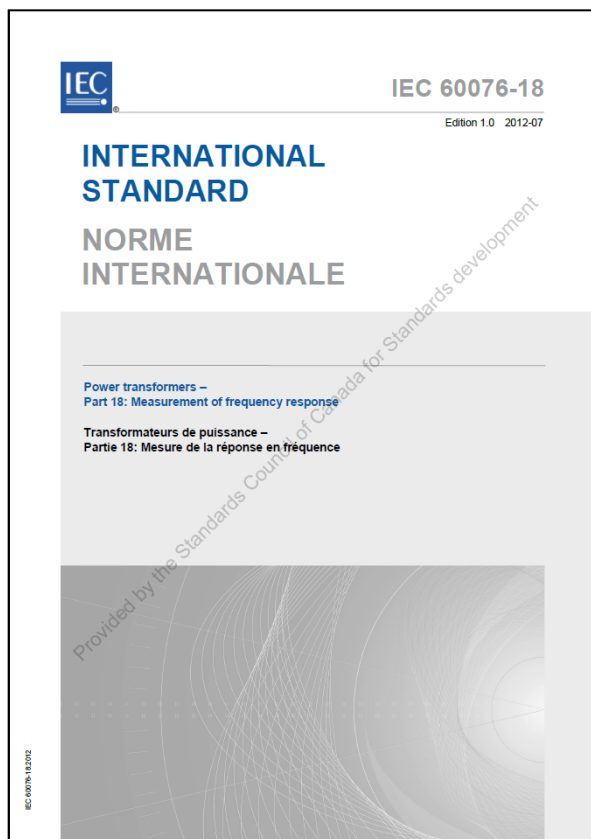
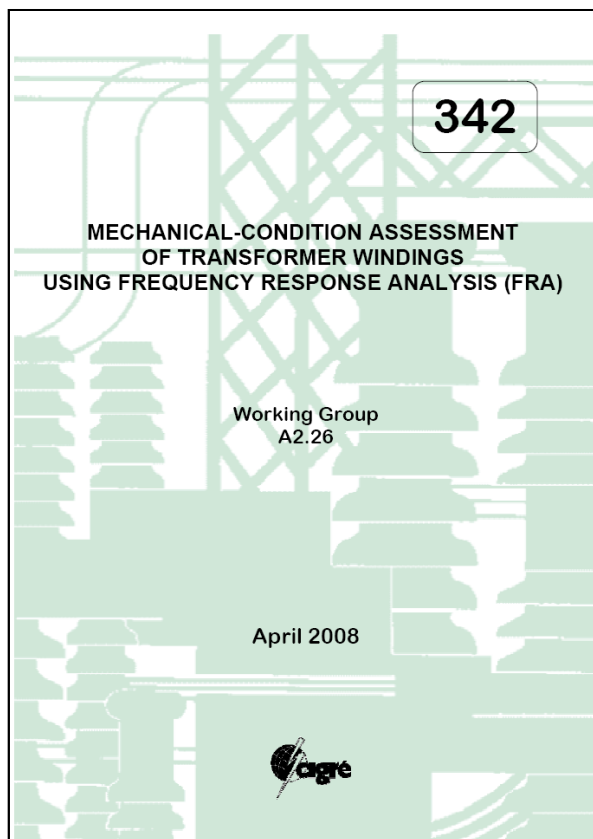
- Интерпретация по-прежнему субъективна
  - Визуальная оценка кривых
  - Сравнение с предыдущими измерениями, аналогичными моделями трансформаторов, или пофазное сравнение
- Существует потребность в более подробных указаниях по интерпретации результатов
  - Объяснительные ответы: факторы, влияющие на измерение, физические аспекты
  - Необходимо собрать примеры исследований (тесты на короткое замыкание, поле)
  - Исследование числовых индексов для помощи в объективной интерпретации

# Разработки метода СИГРЭ, МЭК и IEEE

CIGRE TB 342  
2008

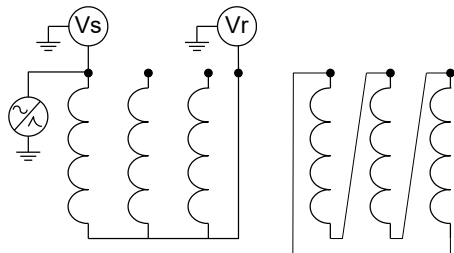
МЭК 60076-18  
2012

IEEE C57.149  
2012

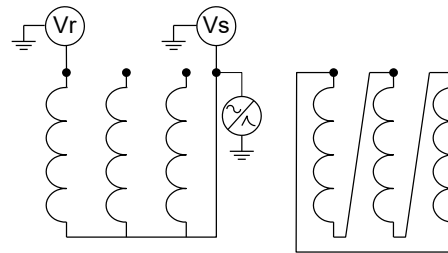


# Типы измерений FRA по определению CIGRE

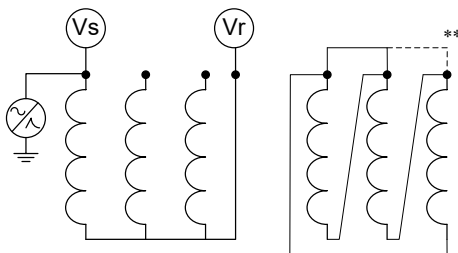
(a) Начало-Конец (Источник на Вводе Фазы)



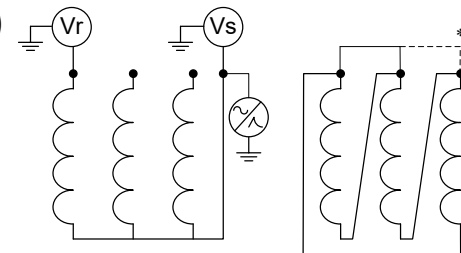
(b) Начало-Конец (Источник на Вводе Нейтрали)



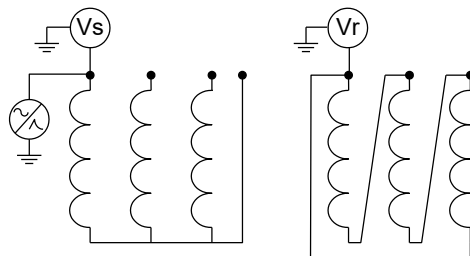
(c) Начало-Конец с закороткой (Источник на Вводе Фазы)



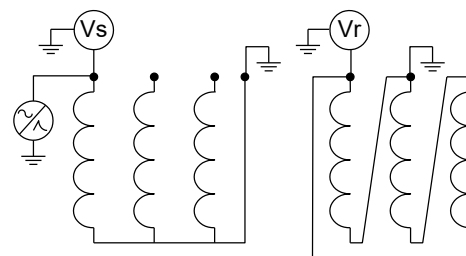
(d) Начало-Конец с закороткой (Источник на Вводе Нейтрали)



(e) Емкостная межобмоточная

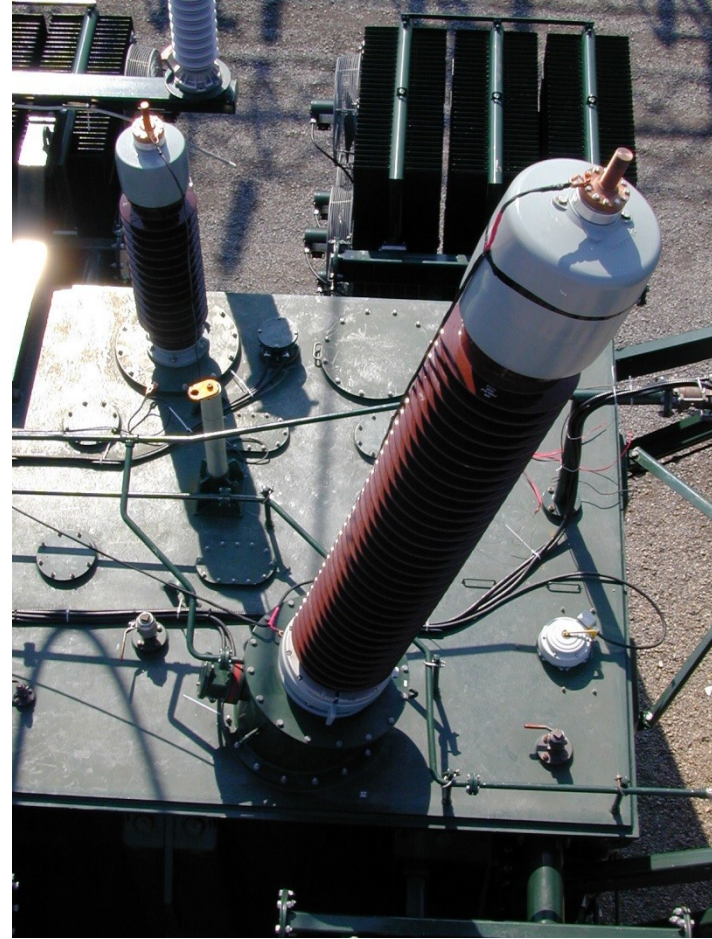


(f) Индуктивная межобмоточная



# Измерения в соответствии с МЭК

- Измерения от Начала к Концу для всех обмоток. Остальные вводы не заземлены и не закорочены
- Для соединений типа «Звезда с нулём», исходный импульс и референс подсоединяются к Фазе, отклик снимается с Нейтрали
- Измерения проводятся с РПН в положении Максимум (обмотка полностью включена) и Минимум (обмотка полностью выключена)

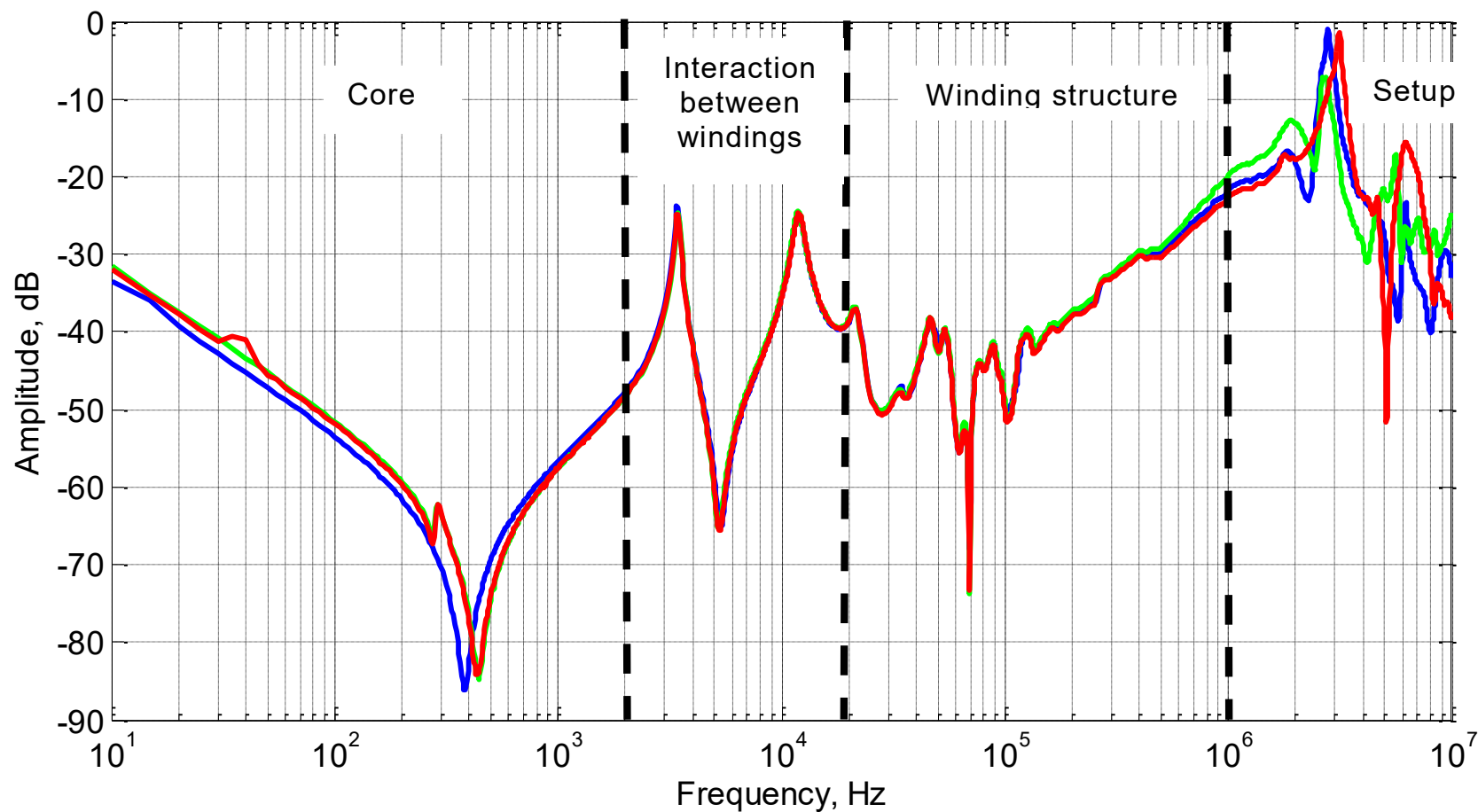


# Измерения в соответствии с IEEЕ

- «Короткозамкнутые схемы» рекомендованы в добавление к стандартным измерениям Начало-Конец, проводимым на всех обмотках
- Положение РПН – **только** Максимум



# Фундаментальная информация по Частотному Отклику Трансформаторов



Источник: МЭК 60076-18, Приложение В (информационное)

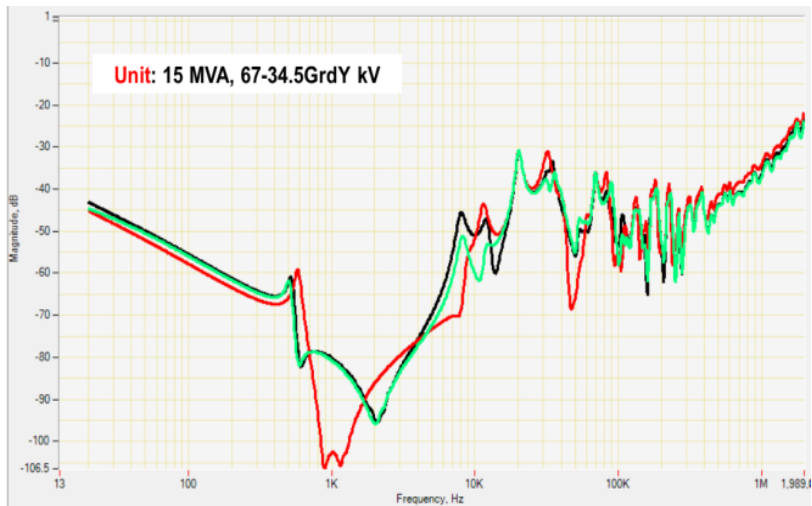
# Факторы, влияющие на измерения и интерпретацию

***Если в данных произошли изменения – никому нельзя верить: диагност виновен, пока не доказана его невиновность!***

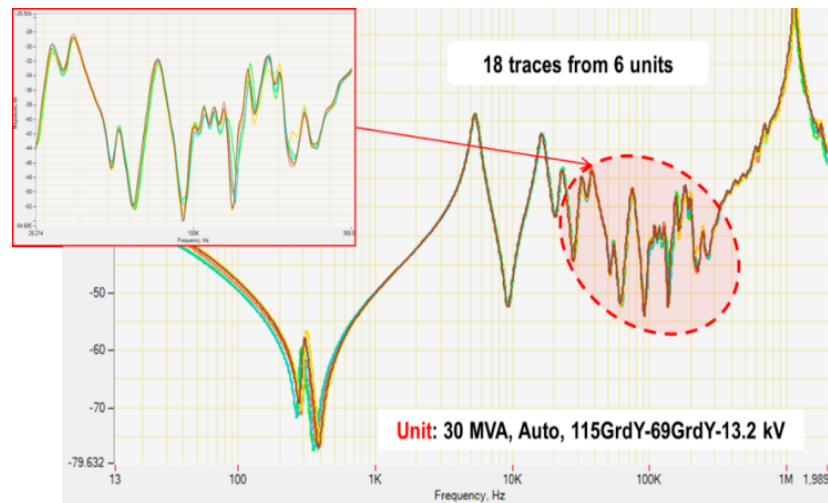
- Межфазное сравнение
- Сравнение с аналогами
- Состояние сердечника
- Влияние положения РПН и его предшествующего положения
- Плохой контакт
  - К фланцу ввода
  - К другим подключениям
  - Закороток
- Влияние заземления сердечника
- Наличие и отсутствие изоляционной жидкости
- Температура

# Примеры

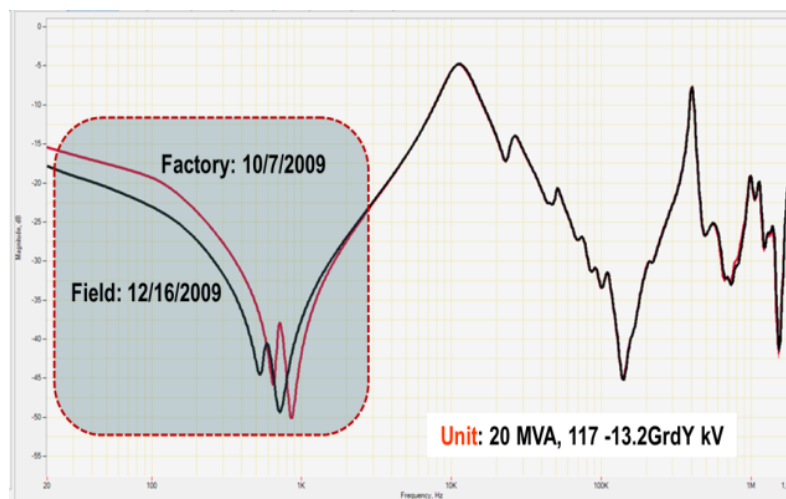
## Сравнение между фазами



## Сравнение с аналогами



## Влияние сердечника



# СНГ – стандарты и РД

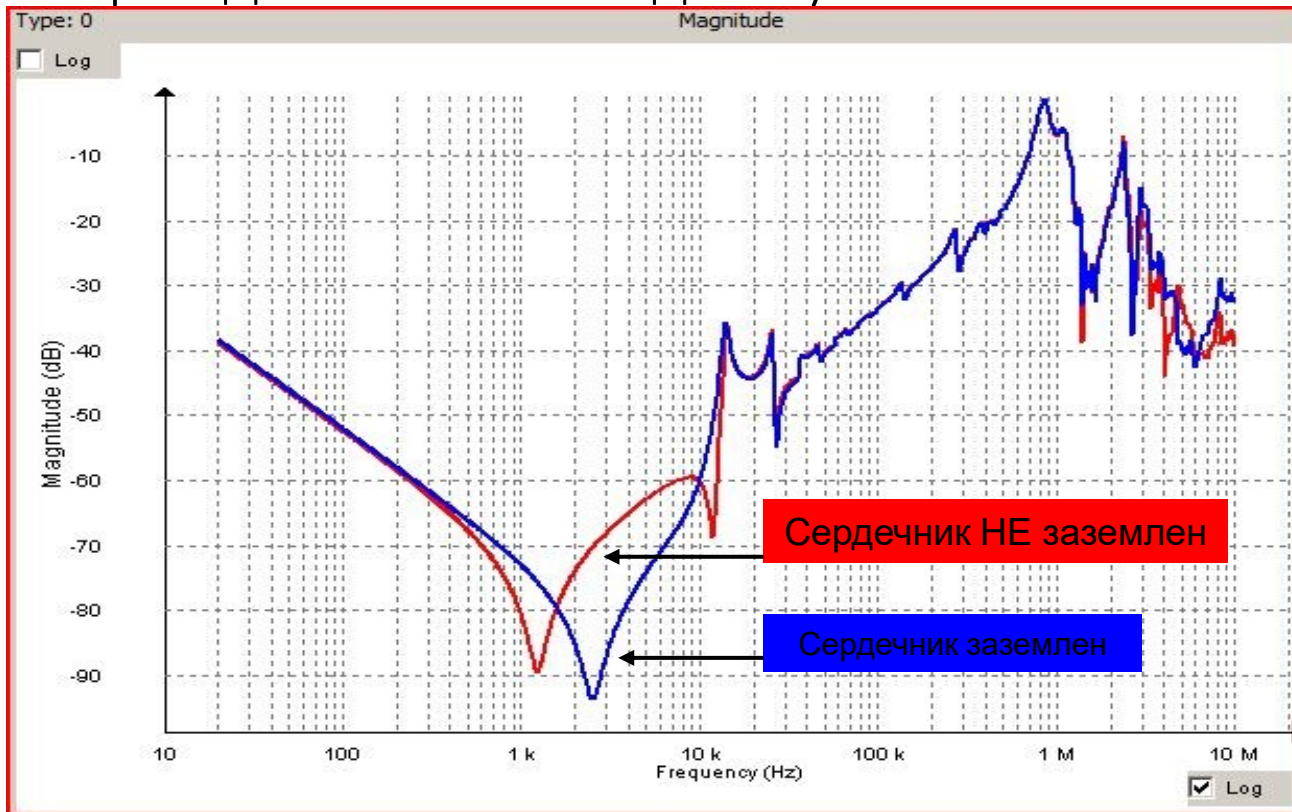
- Беларусь – в стандарт по диагностике внесено требование по выполнению FRA на новых трансформаторах, и объектах, находящихся в эксплуатации
- Россия:
  - В планах ФСК - разработка Методических указаний по применению FRA.
  - Планируемый к пересмотру СТО по аттестации трансформаторов предусматривает обязательность проведения заводами снятия АЧХ для последующего сравнения с АЧХ в эксплуатации.

На что нужно обратить внимание при  
выполнении тестов SFRA?

или

Как извлечь максимальную пользу от денежно-временных  
затрат при выполнении измерений SFRA?

# Тесты при одинаковых исходных условиях

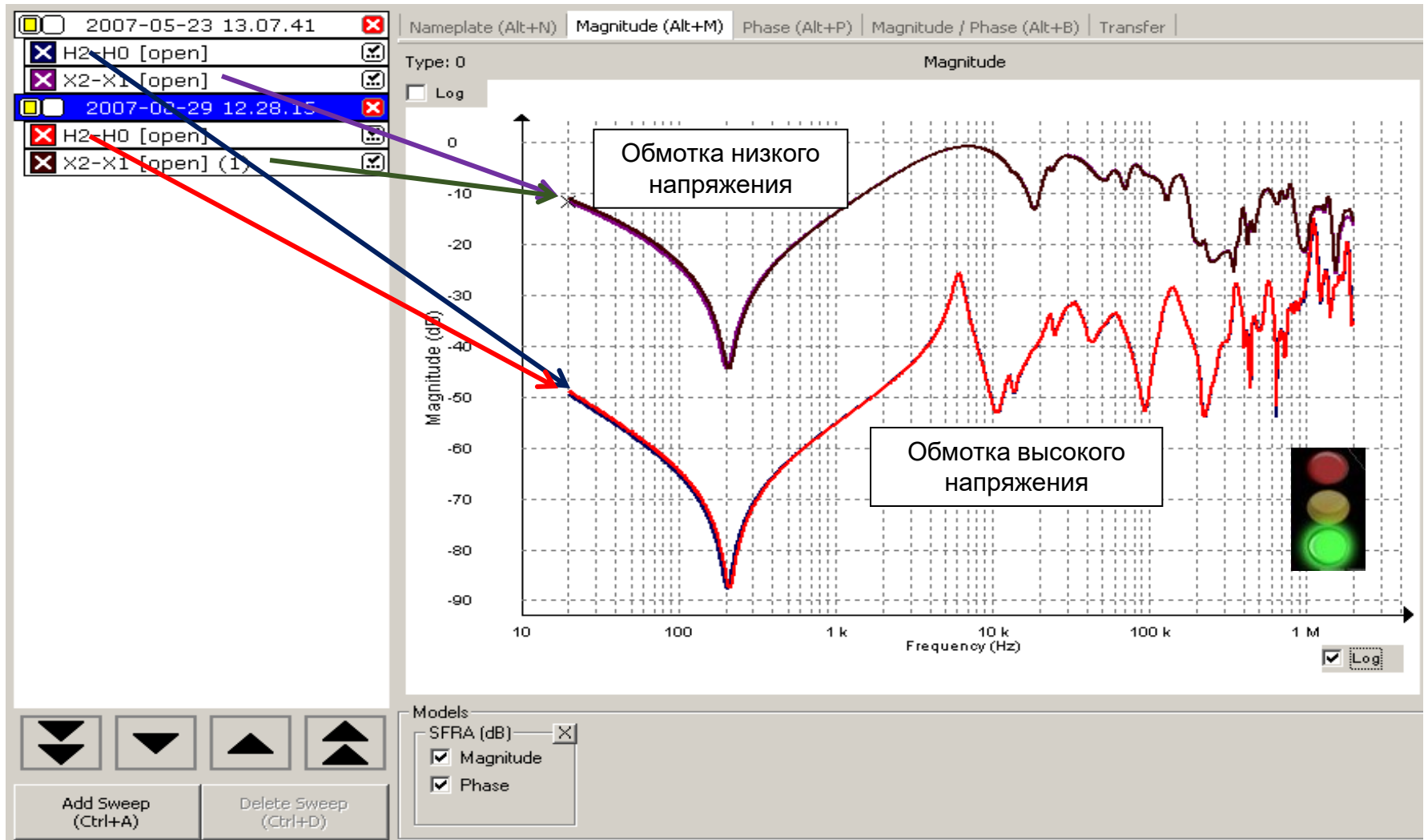


Воспроизводимость результатов измерений представляет исключительную важность!

# Пример хорошей воспроизводимости

- 105 МВА, однофазный генераторный повышающий трансформатор
- Измерения SFRA с помощью прибора FRAX 101 до и после серьезного короткого замыкания в генераторе
  - Две разные тестовые установки
  - Тесты проведены двумя разными людьми
  - Тесты проведены в разные дни

# До (2007-05-23) и после неисправности (2007-08-29)



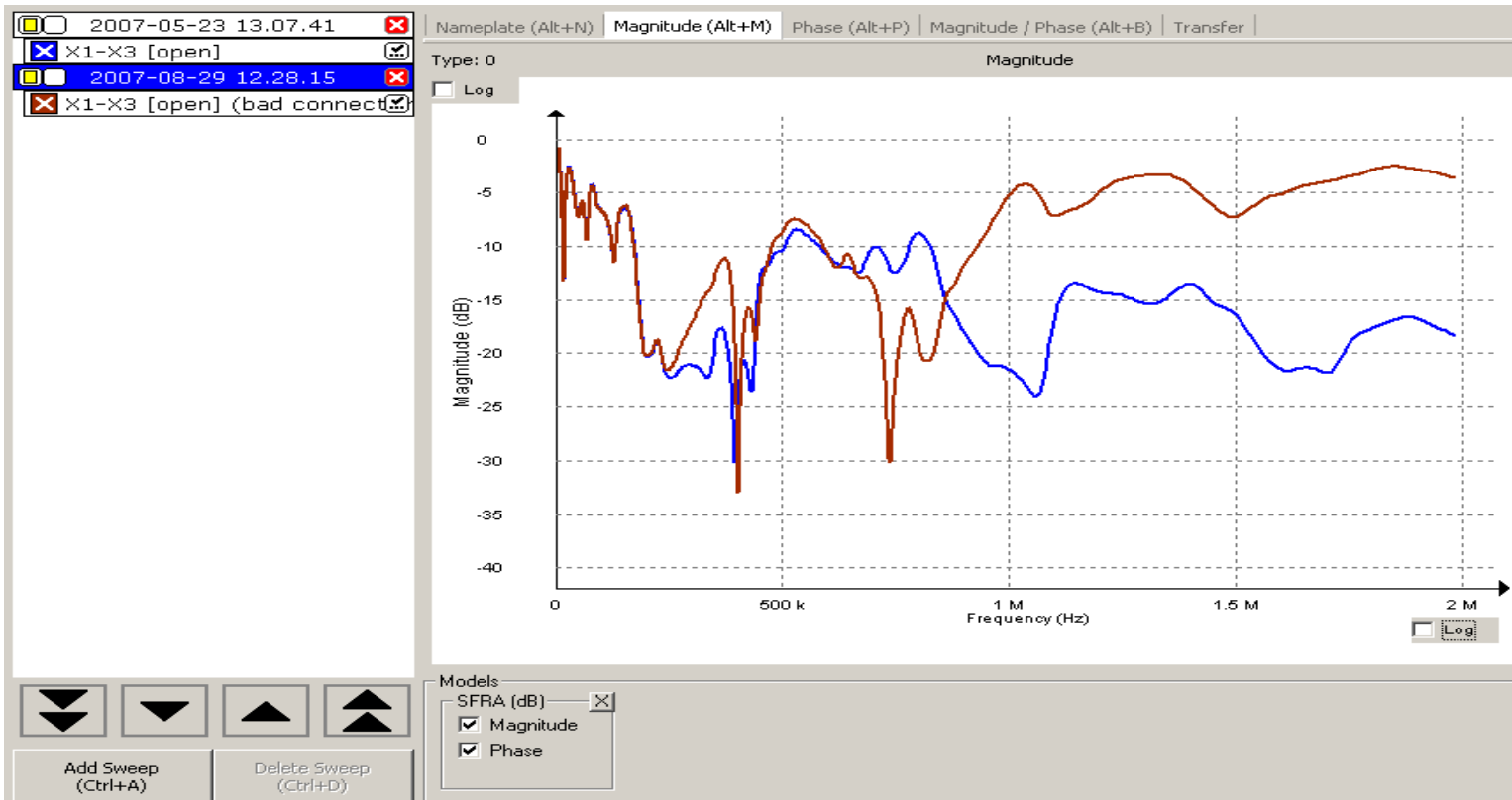


# Возможные факторы, оказывающие негативное влияние на результаты измерений

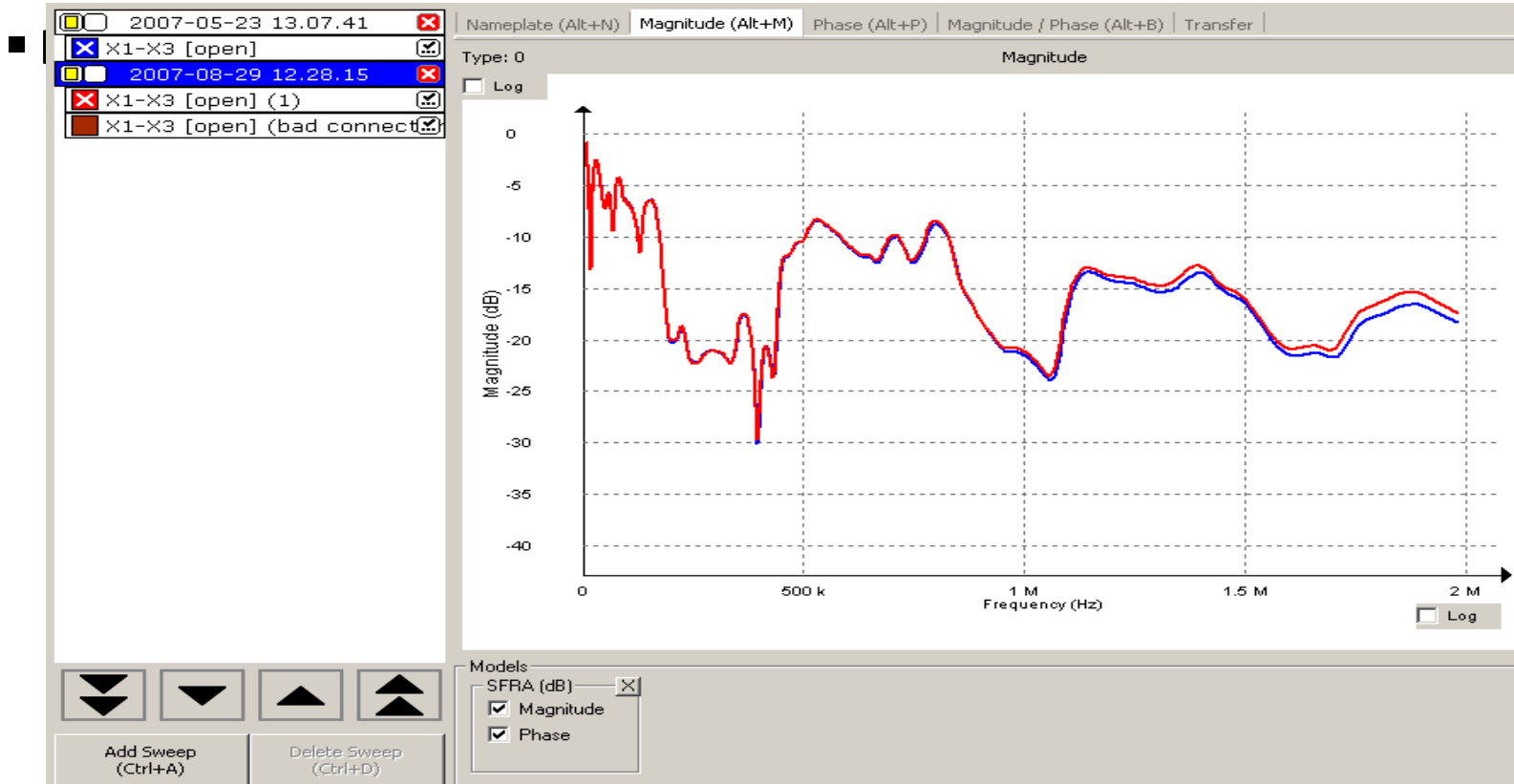
- Качество соединения
- Заземление экрана
- Динамический диапазон прибора/внутренний минимальный уровень шума
- Влияние различных свойств сердечника на низкие частоты в результатах SFRA-измерений, проведенных на «разомкнутых» схемах

# Плохое соединение

- Плохое соединение может негативно влиять на кривую на высоких частотах



# Хорошее соединение

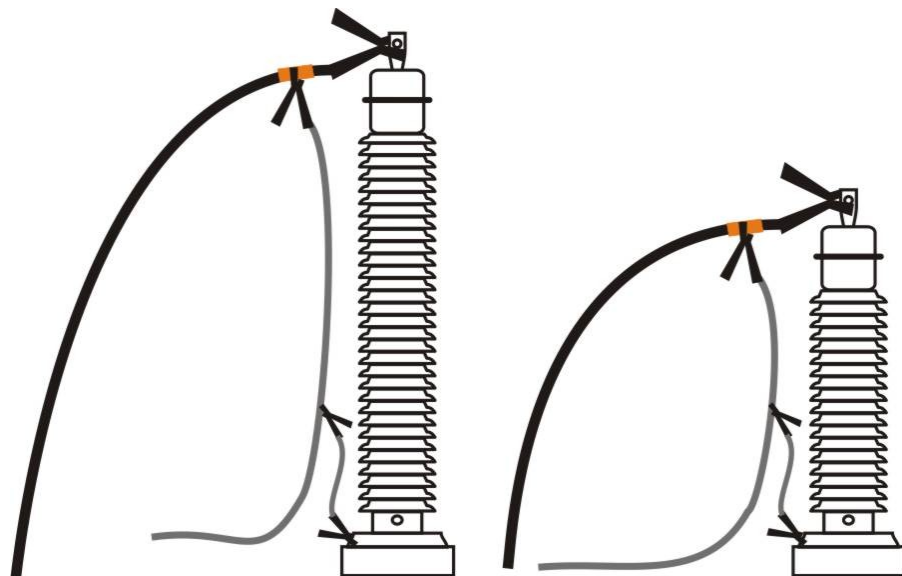


# C-образная струбцина

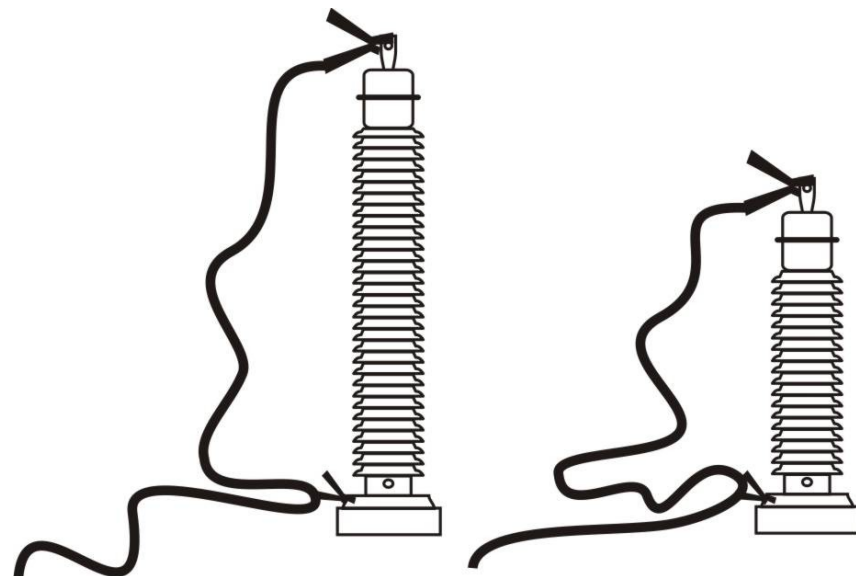
- C-образная струбцина обеспечивает хороший контакт
- Проникает сквозь непроводящие слои
- Обеспечивает прочную связь с круглой или плоской шинами
- Уменьшает натяжение кабеля
- Отдельный разъем для одиночной или составной заземленной оплетки



Правильное соединение с землей обеспечивает воспроизводимость на высоких частотах



Заземление в соответствии с рекомендациями CIGRE; используется короткая оплетка от кабельного экрана до фланца изолятора



Плохое заземление

# Влияние сердечника

- Негативное воздействие можно попробовать свести до минимума, однако, придется смириться с тем, что некоторая разница в результатах измерений всё равно будет иметь место.
- Желательно:
  - Выполнить SFRA-измерения до измерений сопротивления обмотки (или размагнитить сердечник до выполнения SFRA-измерений)
  - Используйте одно и то же измерительное напряжение для всех SFRA-измерений

# Выполняйте проверку сопротивления обмотки после измерений SFRA!



# FRASCAN100

- Сделано в России
- Методика проведения испытаний имеет более 30 лет опыта применения в России и СССР
- В одном приборе выполняются измерения SFRA и IFRA
- Крепкий переносной кейс
- Расширенное ПО для Анализа
- Помощь и поддержка 24/7





# SFRA 5000

- Различные режимы измерения: FRA, RMS, LCR, Осциллограф
- Высокая точность
- LCR режим: полнофункциональный измеритель параметров LCR трансформатора
- Легкий и портативный
- Встроенный дисплей
- Прибор с самым широким функционалом на рынке!



Спасибо за внимание!

**tFRA.ru**

Мировые новости, статьи,  
общение на тему механической  
стойкости трансформаторов

Сергей Дробышевский

8 (925) 730 03 65

[sergey.drob@gmail.com](mailto:sergey.drob@gmail.com)