



Введение в метод контроля дальним полем RFT

Сигналы и чувствительность



Обозначения и сокращения

Метод дальнего поля = RFT – Remote Field Testing

HØ – наружный диаметр

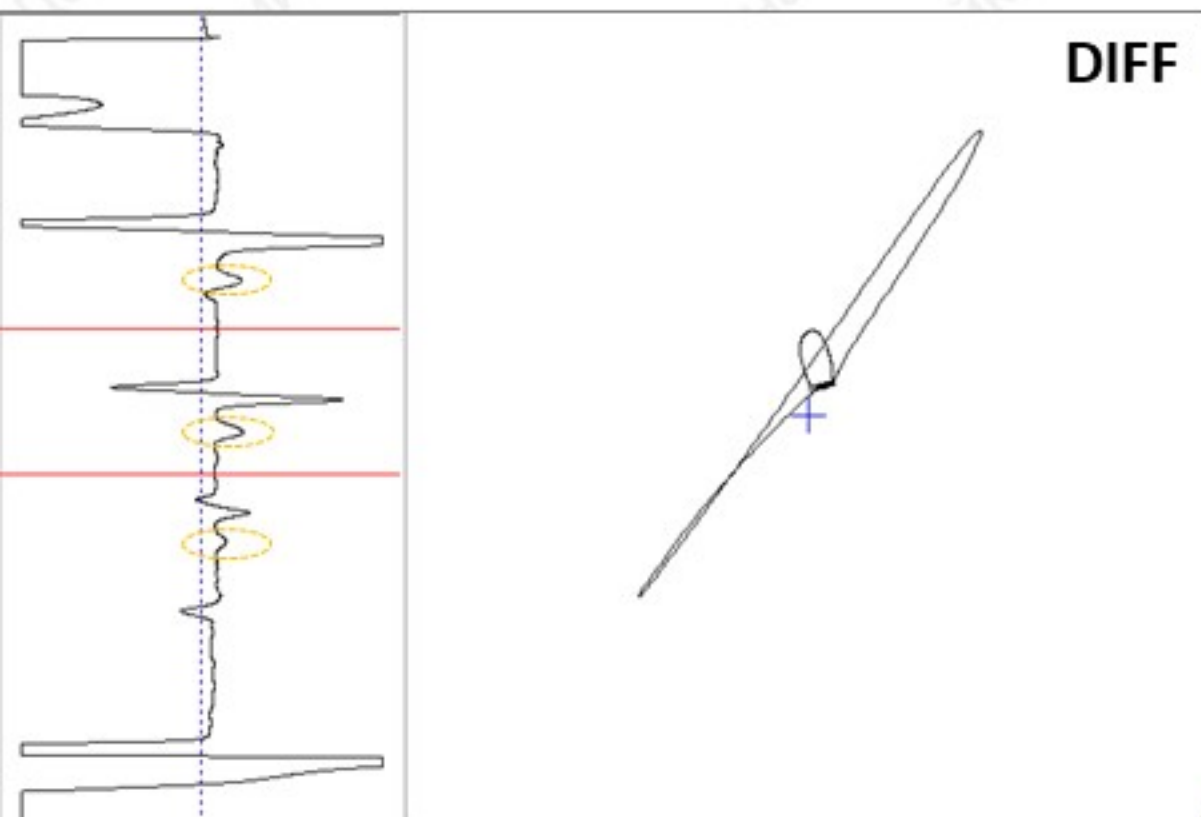
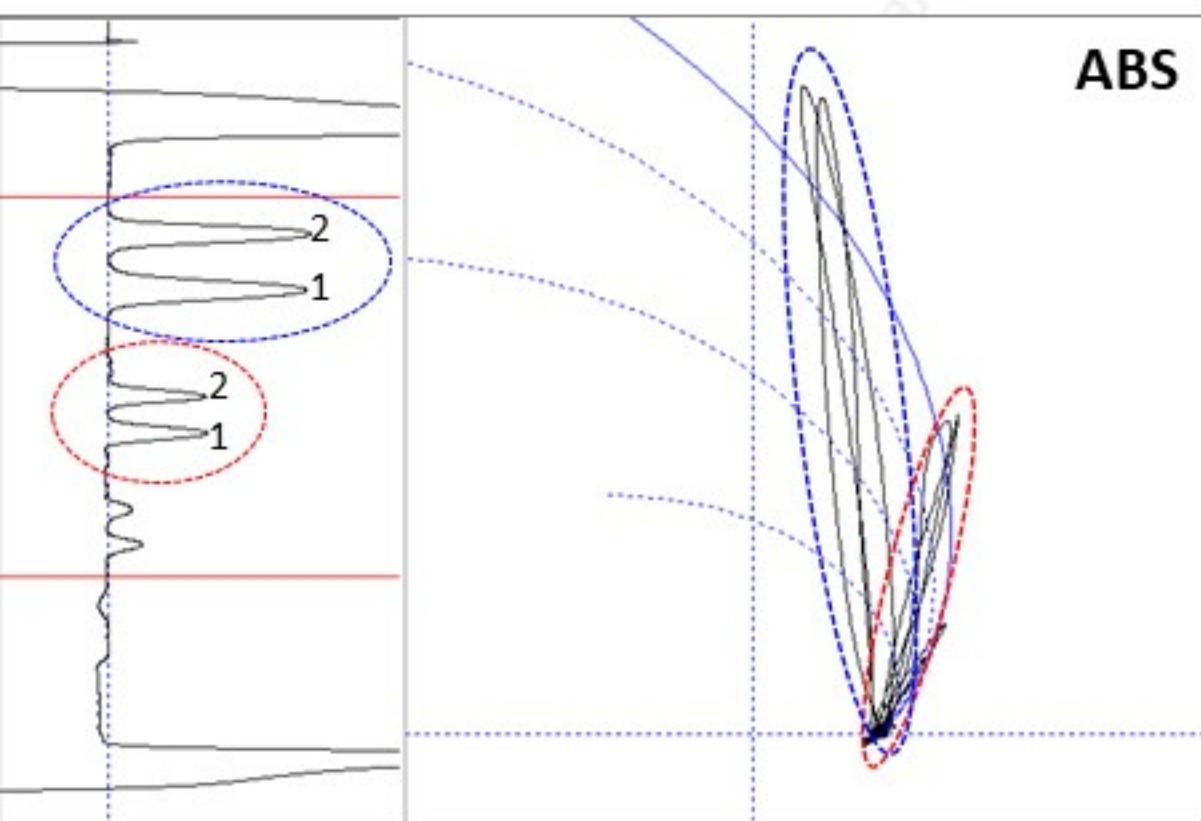
BØ – внутренний диаметр

TSP, TS сигнал – сигнал от опорной плиты (Tube Support Plate), вызванный экранированием и ослаблением дальнего поля большим объёмом металла вокруг трубы

Lift off – термин используемый в англоязычной технической литературе и программном обеспечении, означает:

- зазор между катушкой зонда и металлом;
- полный отрыв катушки зонда от металла, в зависимости от контекста.

Формы сигналов от дефектов



Анализ сигналов в методе контроля дальним полем является сложной задачей. Важно принимать во внимание и применять теорию в основе метода; знать наиболее распространённые формы сигналов от простых дефектов; очень важно запоминать форму TSP сигнала (от опорной плиты), это поможет обнаружить дефекты в зоне трубки с опорной плитой.

Сигналы от мелких дефектов на ABS канале при использовании зонда с одним передатчиком:

- создают два сигнала на полосовом графике: 1 - когда приемник проходит мимо дефекта; 2 - когда передатчик проходит мимо дефекта;

- угол наклона сигнала на комплексной плоскости указывает на глубину дефекта дефект выделенный **синим**, глубже, чем дефект, выделенный **красным**.

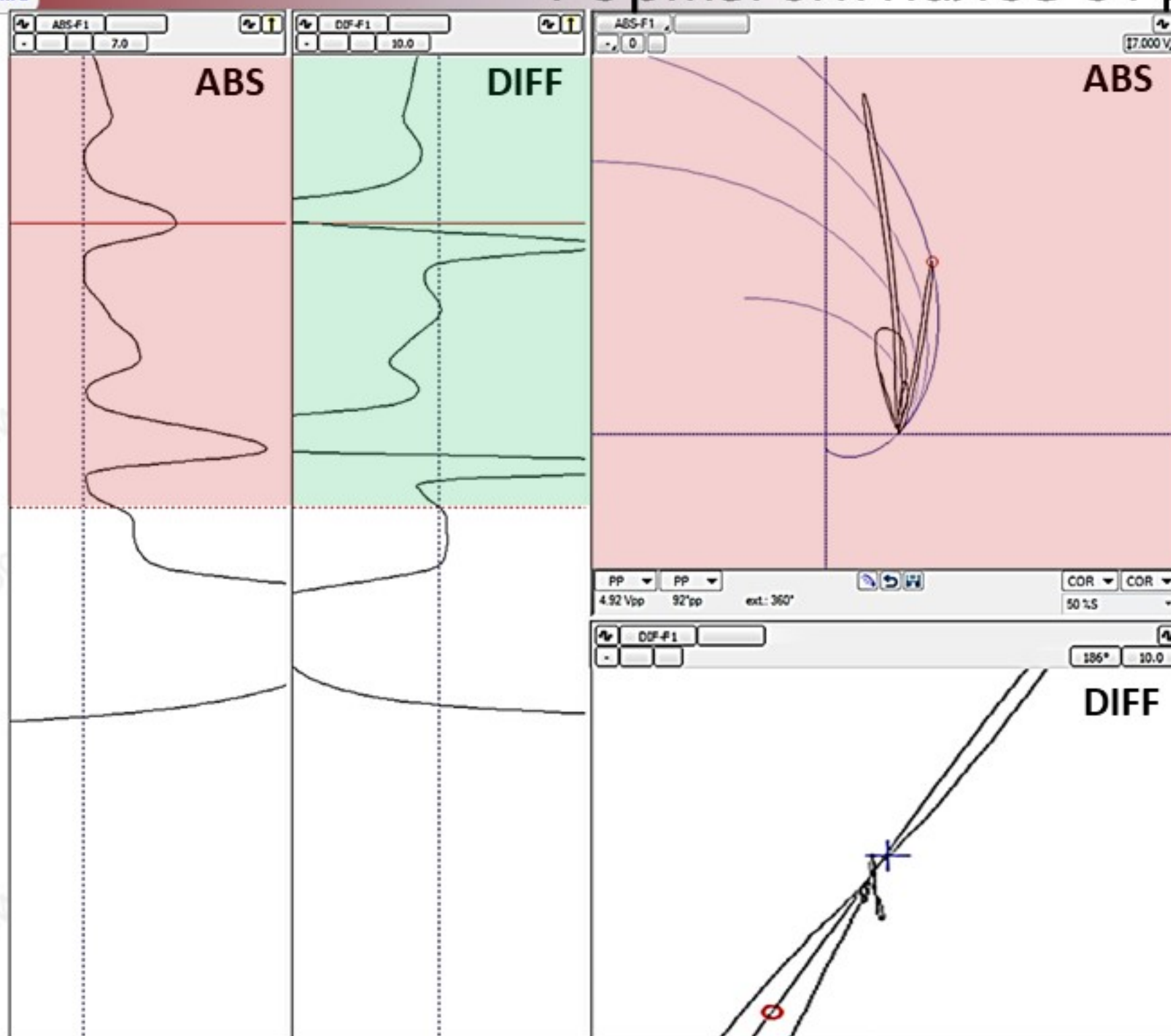
Сигналы от мелких дефектов на DIFF канале при использовании зонда с одним передатчиком имеют синусоидальную форму на полосовом графике.

Данные на полосовом графике считывать сверху вниз, при этом сигнал дефекта начинается слева и заканчивается справа при проведении контроля в соответствии с ASME или ASTM E2096 E2096M.

В зависимости от размера дефекта, после синусоидального сигнала можно увидеть **небольшой сигнал** от передатчика.



Формы сигналов от дефектов



Сигналы от мелких дефектов на ABS канале при использовании зонда с двумя передатчиками представляют собой три пика: один от приёмника и два по бокам, исходящие от передатчиков.

При этом на полосовом графике DIFF канала два сигнала от передатчиков.



Формы сигналов от дефектов

ABS

Сигналы от протяжённых дефектов на ABS канале при использовании зонда с одним передатчиком имеют характерный вид:

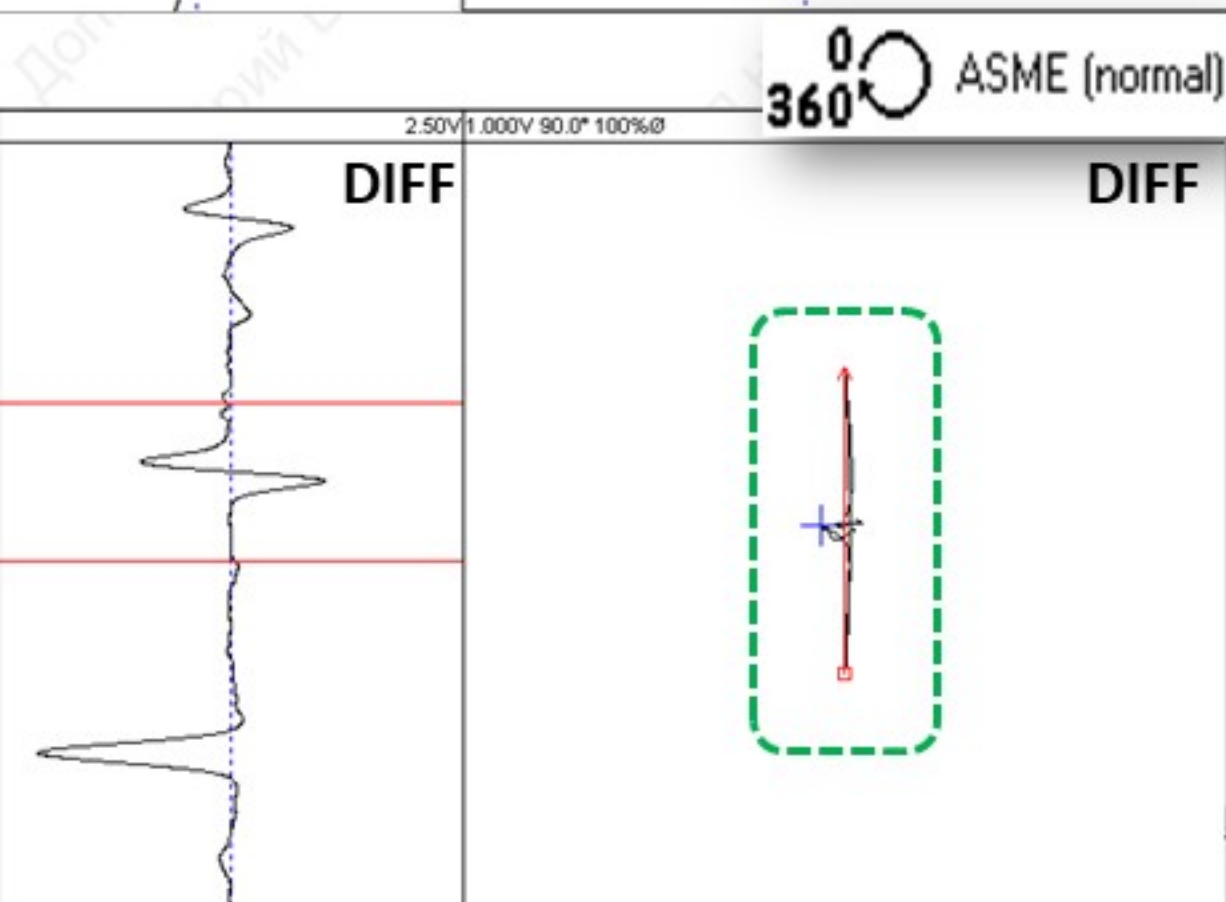
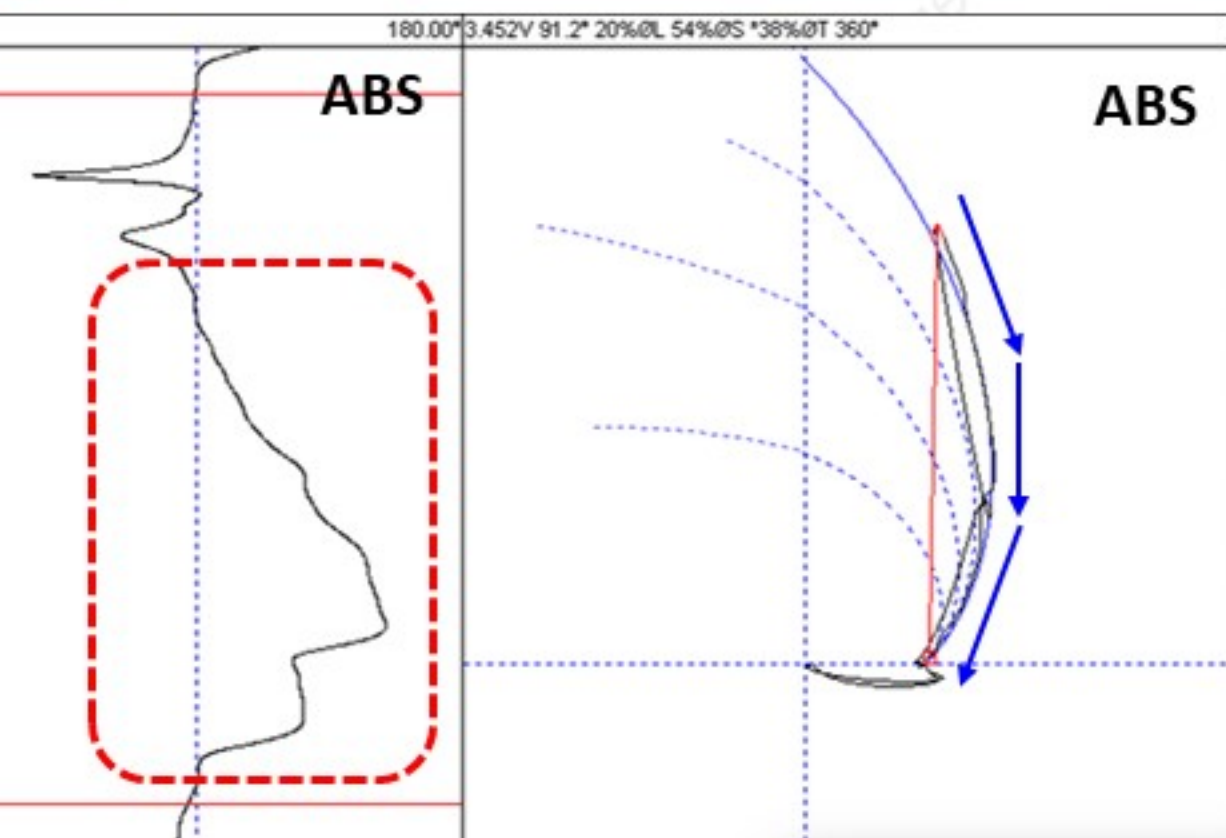
- на полосовом графике сигнал напоминает «голову и плечи»;
- на комплексной плоскости «собачью ногу».

DIFF

Сигналы от протяжённых дефектов на DIFF канале при использовании зонда с одним передатчиком обозначают **начало** и **конец** дефекта, если края дефекта с резким переходом. Такой дефект трудно измерить с помощью дифференциального сигнала.



Формы сигналов от дефектов



Сигналы от конических дефектов имеют характерный вид:

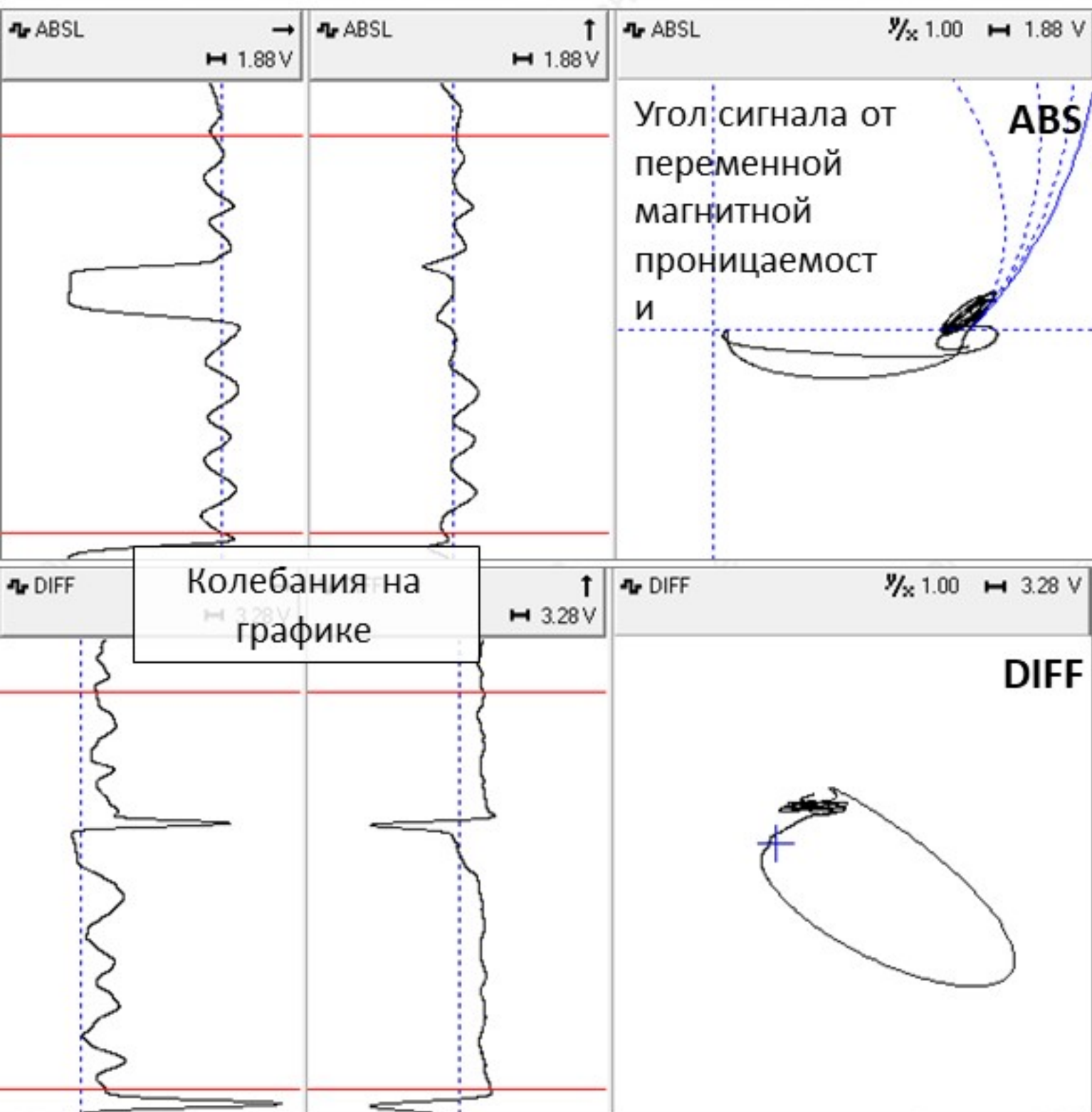
- на полосовом графике **сигнал начинается постепенно и заканчивается падением с двойным пиком**, которые исходят, от приемника и передатчика соответственно;
- на комплексной плоскости сигнал постепенно движется **вдоль спирали** затухания.

Точечные дефекты (питтинги) создают синусоидальный сигнал на полосовом графике. Данные на полосовом графике считывать сверху вниз, при этом сигнал дефекта начинается слева и заканчивается справа при проведении контроля в соответствие с ASME.

Если точечный **дефект сквозной**, то на комплексной плоскости сигнал будет вертикальным.



Формы сигналов от дефектов

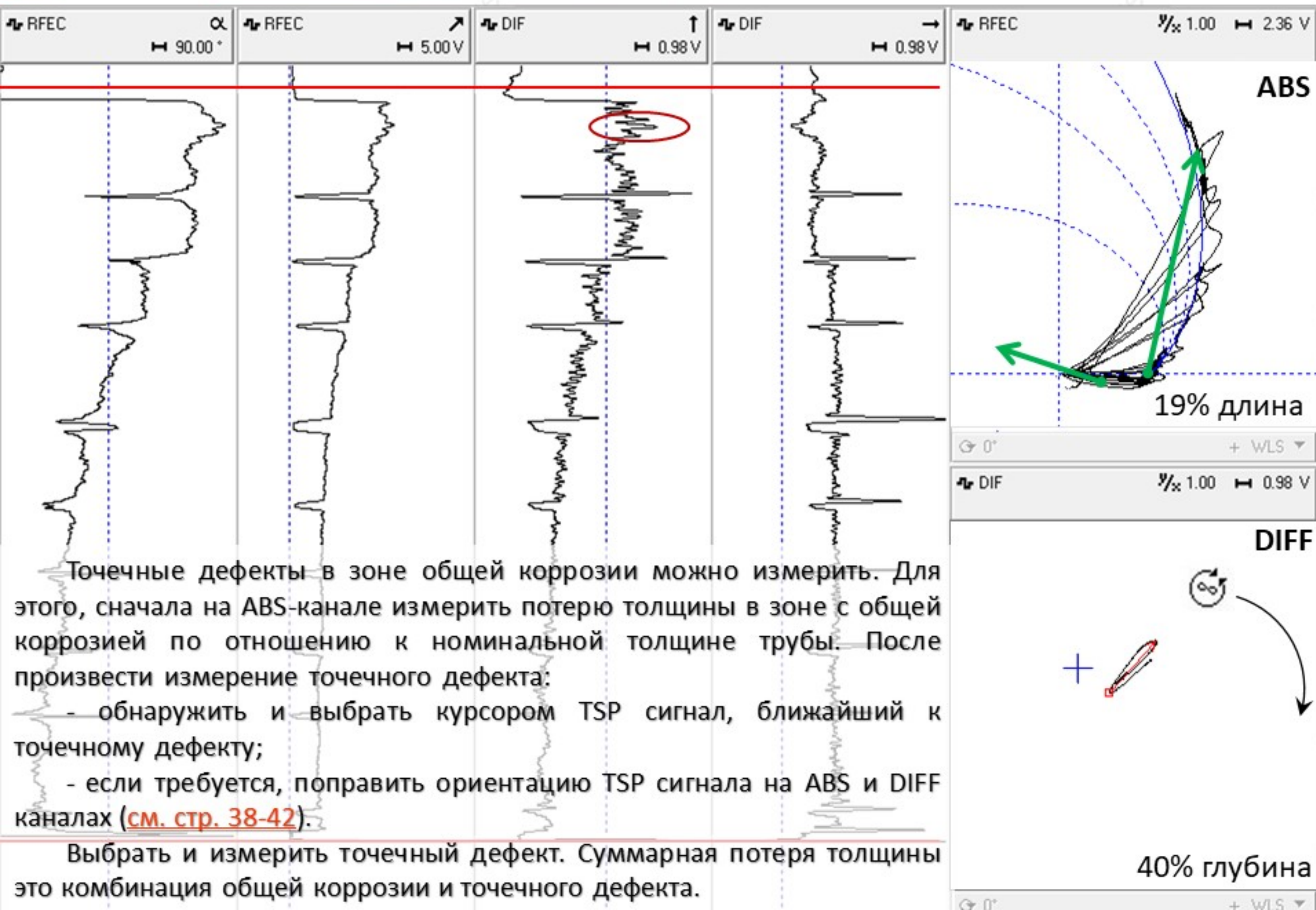


Изменение магнитной проницаемости материала влияют на показания в ABS и DIFF каналах:

- на полосовых графиках это выражено характерным колебанием;
- на комплексной плоскости каждый колебательный пик имеет одинаковый угол наклона.

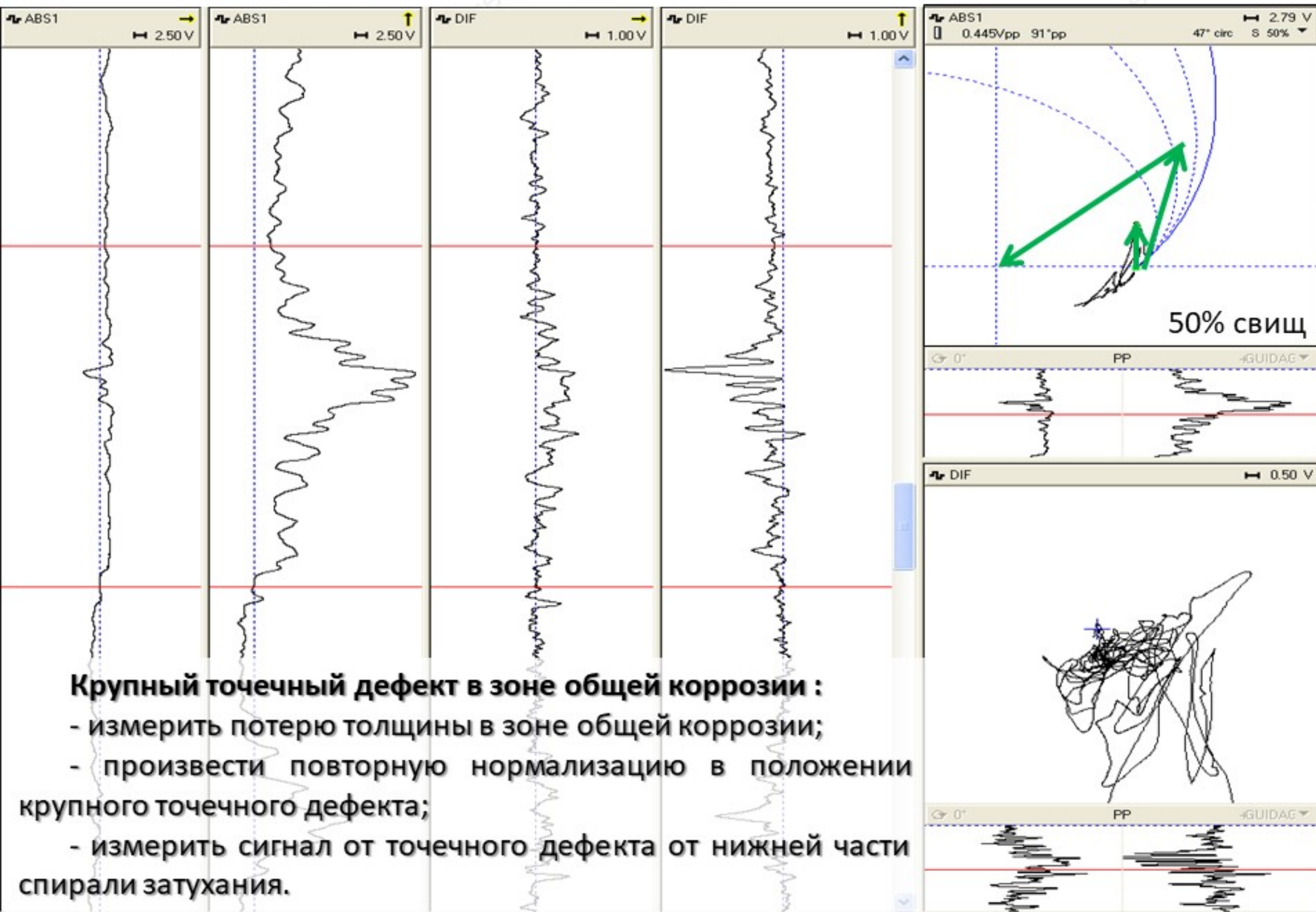


Формы сигналов от дефектов



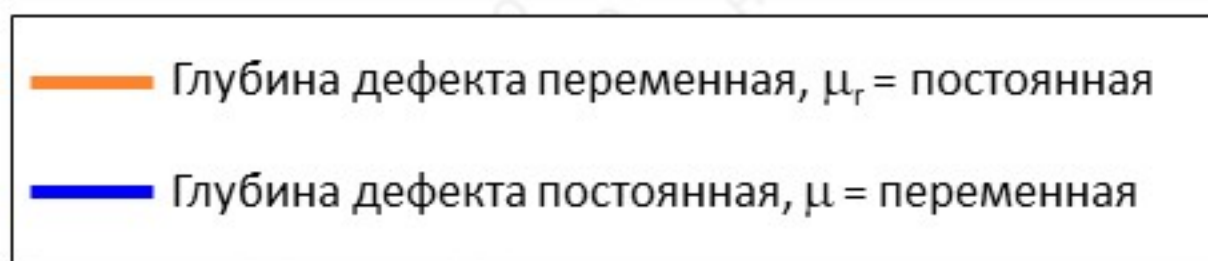
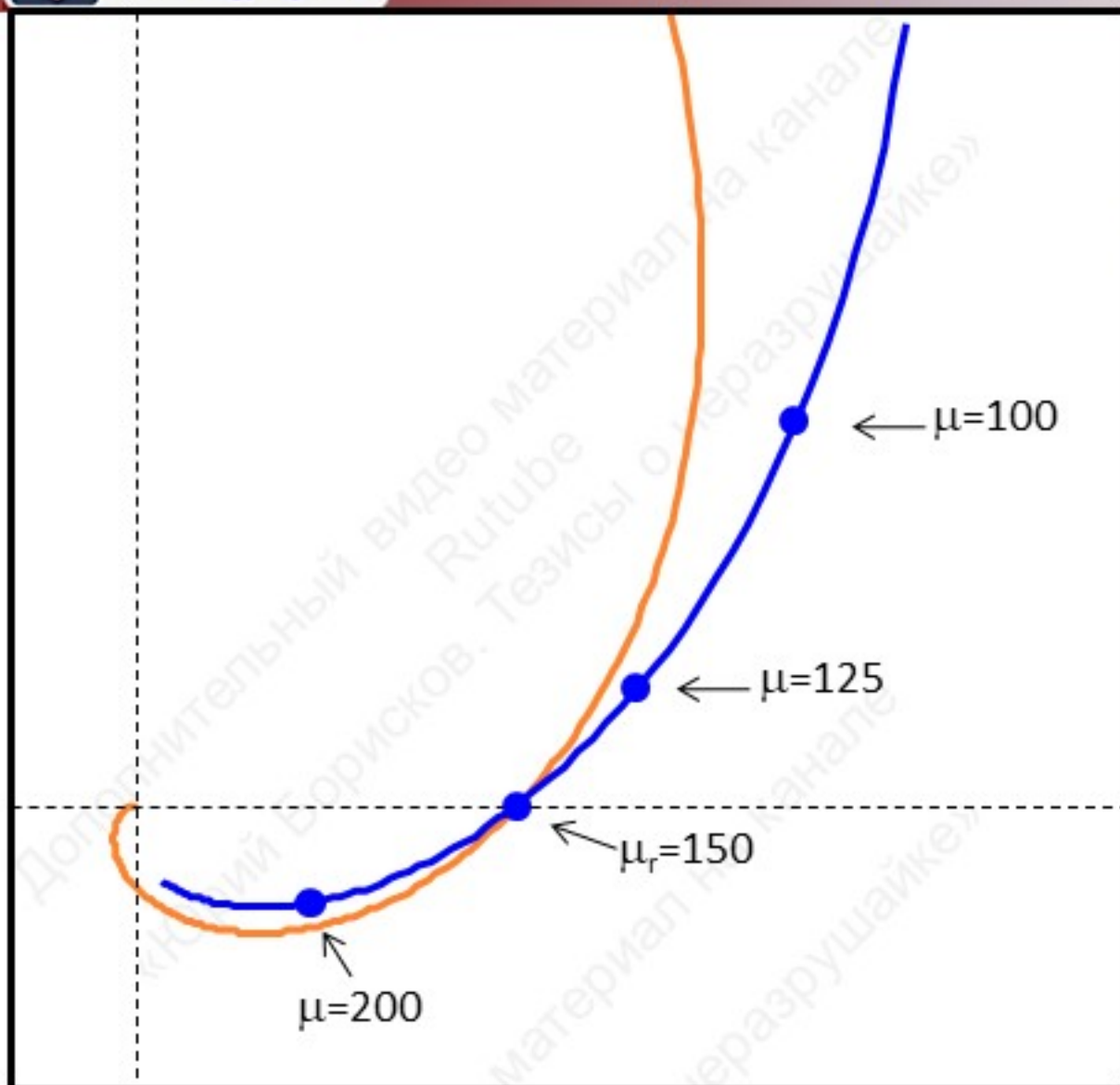


Формы сигналов от дефектов





Что влияет на чувствительность



В углеродистой стали часто встречаются зоны с **переменной магнитной проницаемостью**. Показания с этих зон находятся за пределами **спирали затухания**, откалиброванной системы RFT.

Переменная магнитная проницаемость может быть из-за:

- эксплуатации объекта контроля в высоких температурах;
- холодной обработки некоторых частей объекта контроля (например, в отводах);
- в ходе технологического процесса производства (часто наблюдается на новых трубках).

На графике показаны две модели:

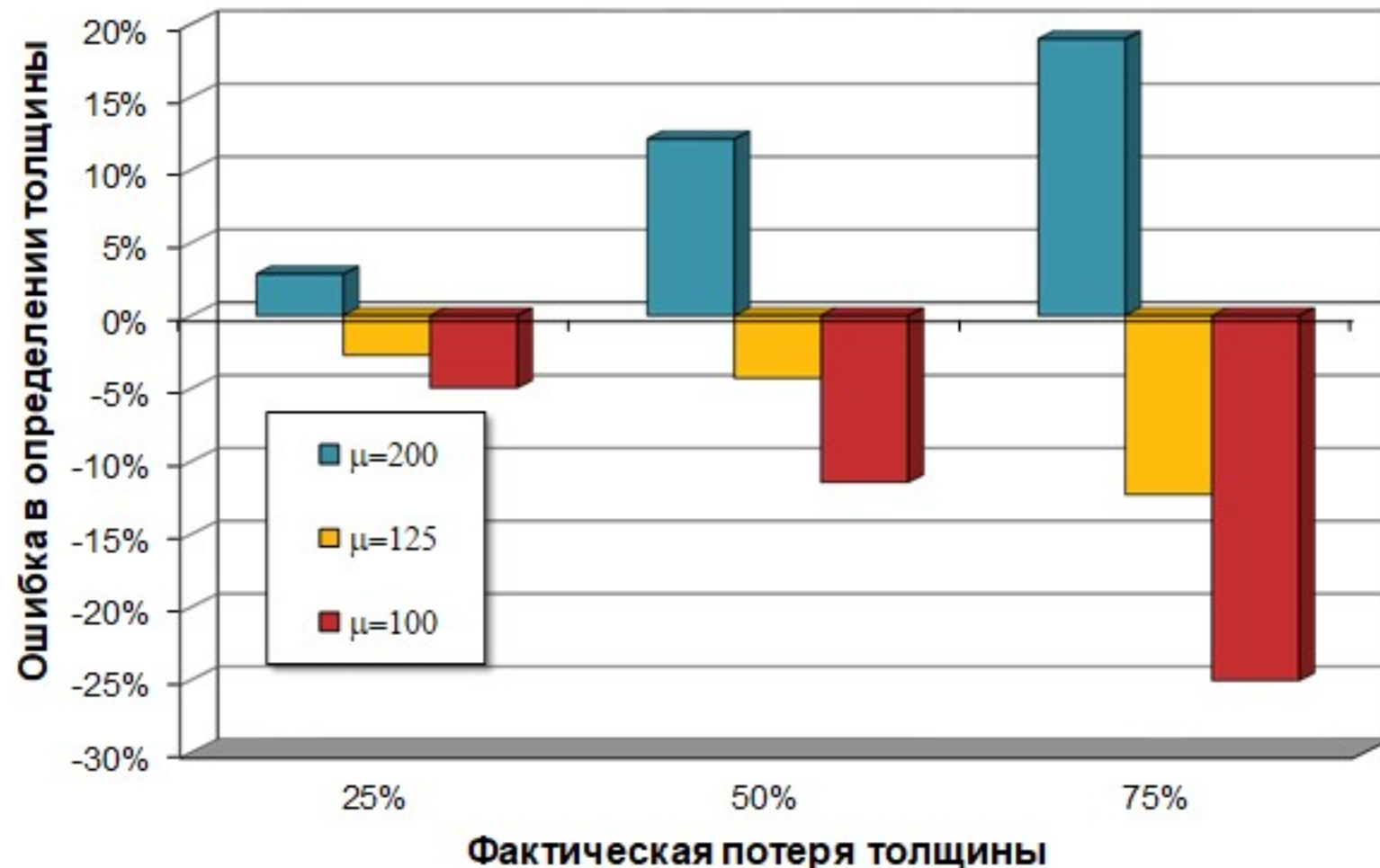
Моделирует сигналы от дефектов разной глубины и с постоянной магнитной проницаемостью (это идеальный сигнал дефекта).

Моделирует сигналы, возникающие из-за изменения магнитной проницаемости материала, при дефектах постоянной глубины (или при отсутствии дефектов).

* Магнитная проницаемость (μ) в СИ: Генри на метр (Гн/м).



Что влияет на чувствительность



Показана ошибка в определении потери толщины если система RFT откалибрована на материал с одной магнитной проницаемостью ($\mu_r=150$), а контроль проводится в зоне, где магнитная проницаемость изменилась:

- 0% зона, где ошибок нет, это достигается при совпадающих при калибровке и у объекта контроля магнитной проницаемости $\mu_r=150$;

- зоны с меньшей магнитной проницаемостью $\mu=100$ и $\mu=125$ приведут недооценке дефектов потери толщины;

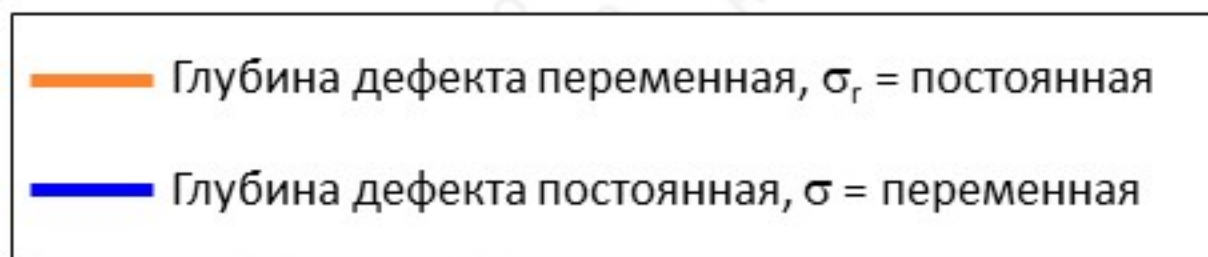
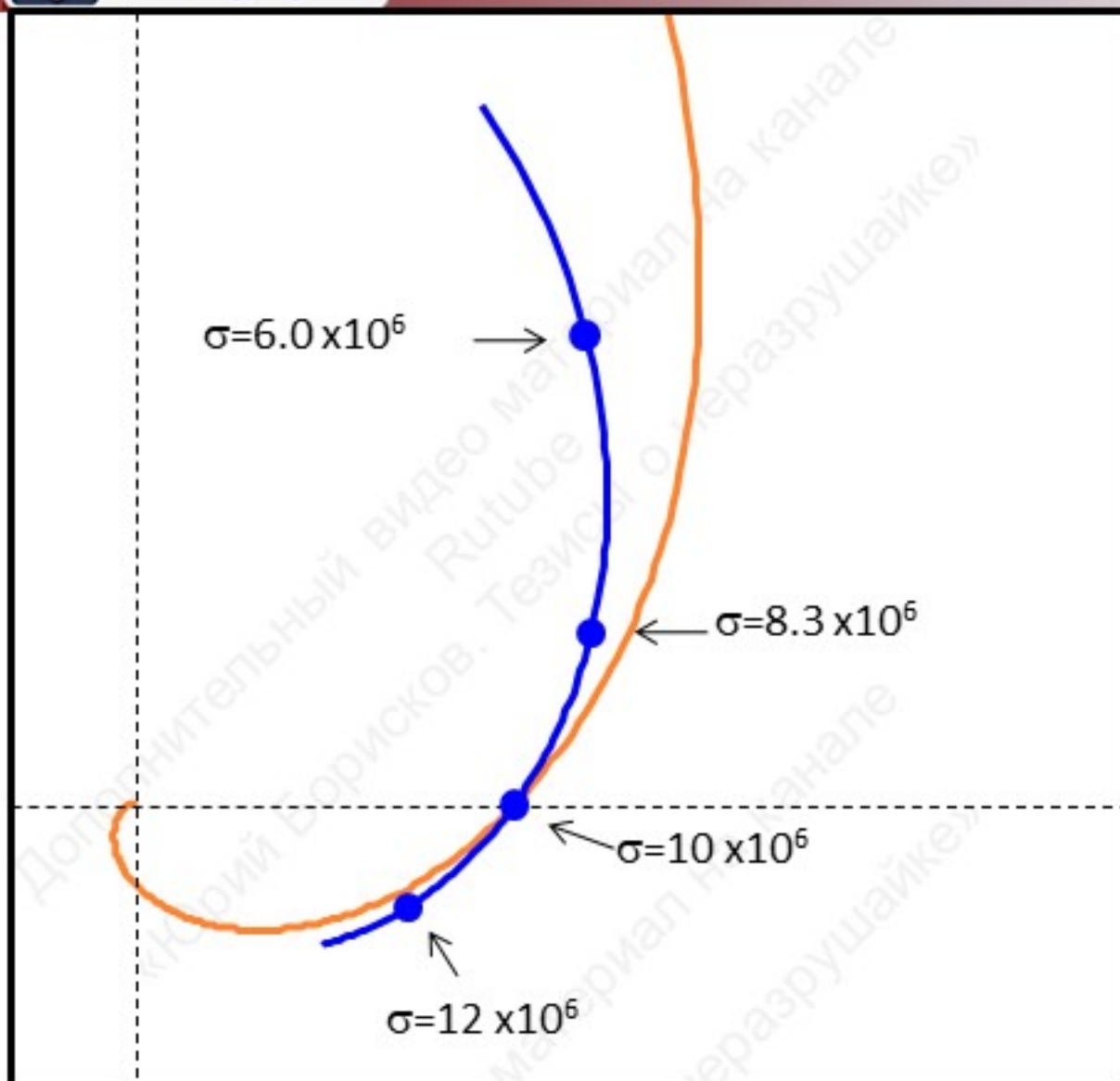
- зона с большей магнитной проницаемостью $\mu=200$ может привести к перебраковке, к завышению дефекта потери толщины стенки.

Например: если реальная глубина дефекта 50% и его измеряют в зоне с $\mu=200$ (при $\mu_r=150$), прибор может показать глубину около 60%. Это может быть серьёзной ошибкой.

По мере увеличения потери толщины увеличивается и ошибка измерения таких дефектов.



Что влияет на чувствительность



Изменения **свойств электрической проводимости** встречаются реже. Они могут быть из-за:

- остаточных напряжений в трубке (например, в воздушных охладителях);
- холодной обработки (например, в изгибах);
- изменения температуры вдоль трубы (например, в трубах нагревателей).

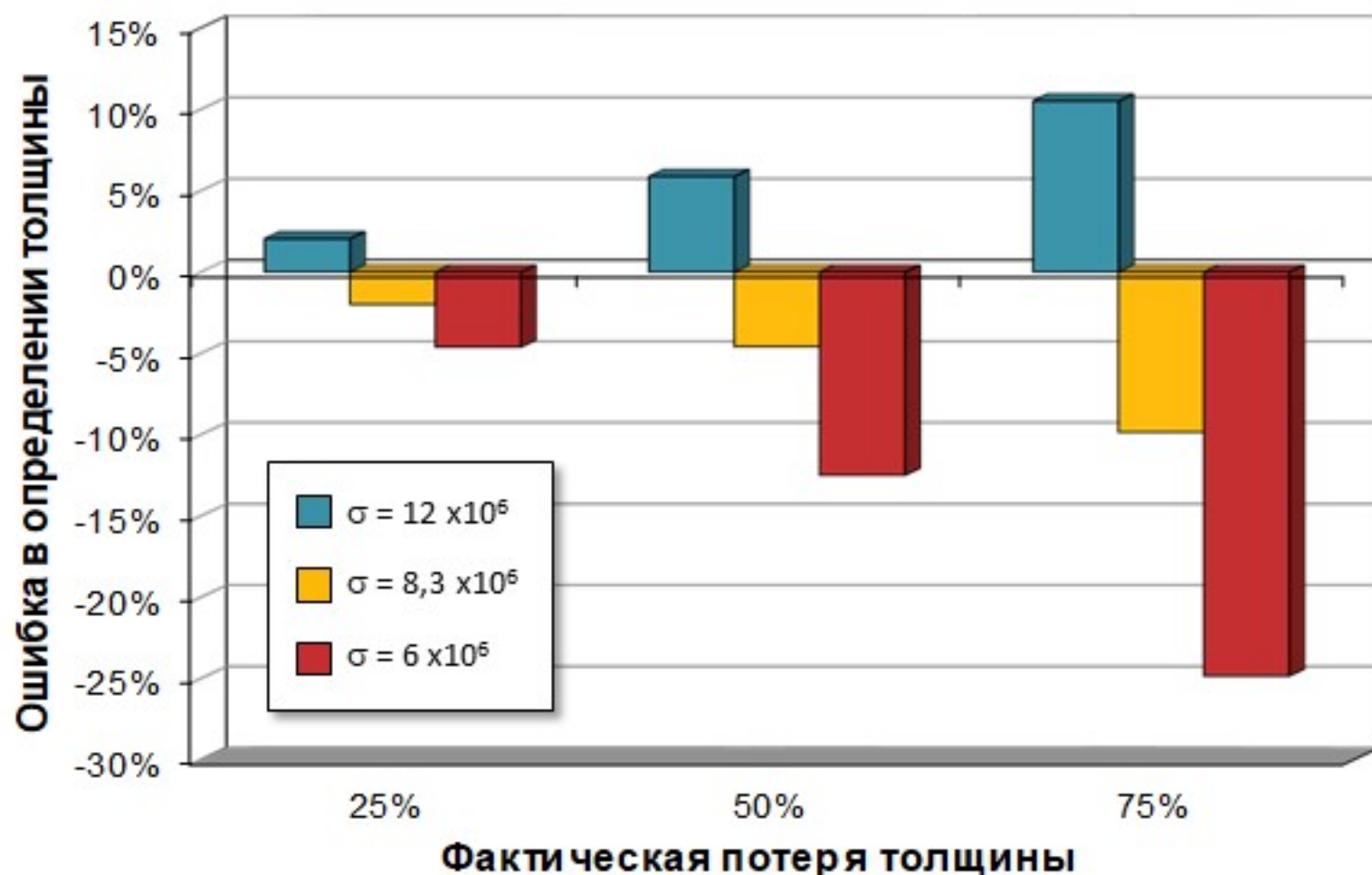
Показания с этих зон могут выглядеть, как странный дефект, но положение в основном до расположения **спирали затухания**.

Эффект от изменения электрической проводимости может быть скрыт более сильным эффектом изменением магнитной проницаемости.

* Электрическая проводимость (σ) в СИ: Сименс на метр (См/м).



Что влияет на чувствительность



Показана ошибка в измерении потери толщины если система RFT откалибрована на материал с одной электрической проводимостью ($\sigma_r = 10 \times 10^6$) и температурой, а контроль проводится в зоне, где электрическая проводимость изменилась, например, вследствие другой температуры нагрева объекта контроля.

Ошибка в измерении толщины при положительных значениях — это завышение глубины дефекта, при отрицательных — занижение.

Устранить фактор изменения электрической проводимости можно путём приведения к одной температуры калибровочной трубки и объекта контроля.

Неточное измерение дефекта опасно в обе стороны. Занижение глубины может привести к пропуску критического дефекта. Завышение глубины может привести к перебраковке и ненужному ремонту, что увеличивает затраты.

Что влияет на чувствительность



Трубная решетка

Геометрические неоднородности
TSP: Трубная решетка/опора/поддержка обладает экранирующим эффектом, что затрудняет обнаружение дефектов в трубке вблизи трубной решётки.

Оребрение (Fins)
создают экранирующий эффект, который значительно снижает чувствительность.



Изгибы (отводы) создают эффект изменения магнитной проницаемости, что приводит к сильному сигналу, который затрудняет анализ.



Трубные опоры

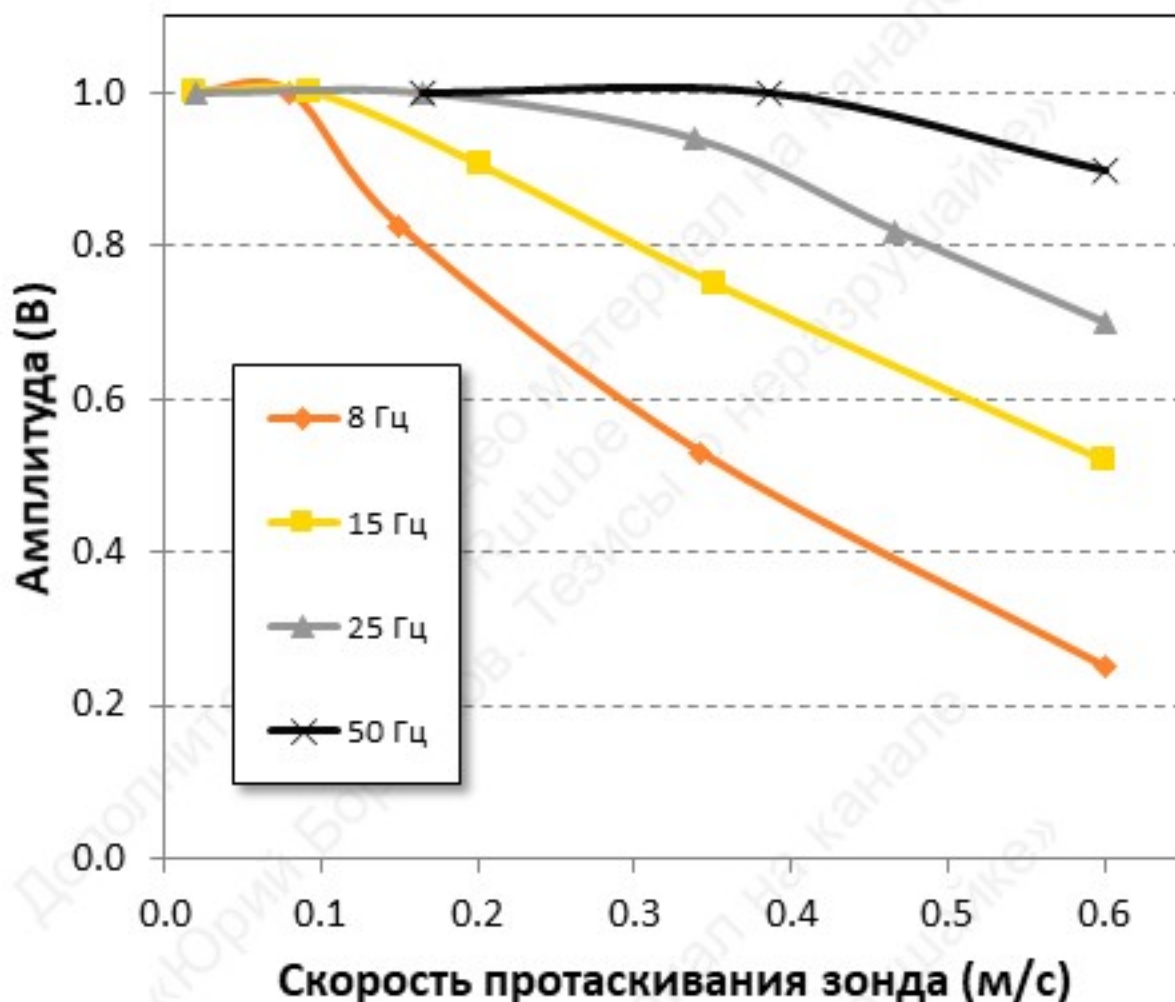
Отводы/изгибы

Контроль зон с геометрическими неоднородностями может в разной степени успешности осуществляться зондами с комбинацией одного-двух передатчиков и приёмников.





Что влияет на чувствительность



Факторы, ограничивающие скорость протаскивания зонда в трубке:

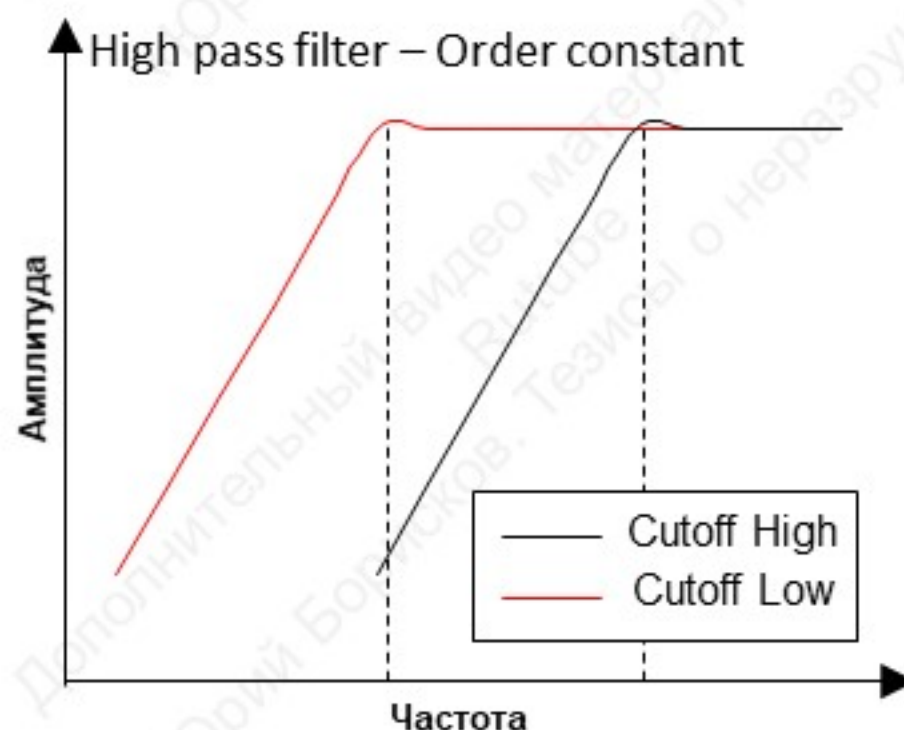
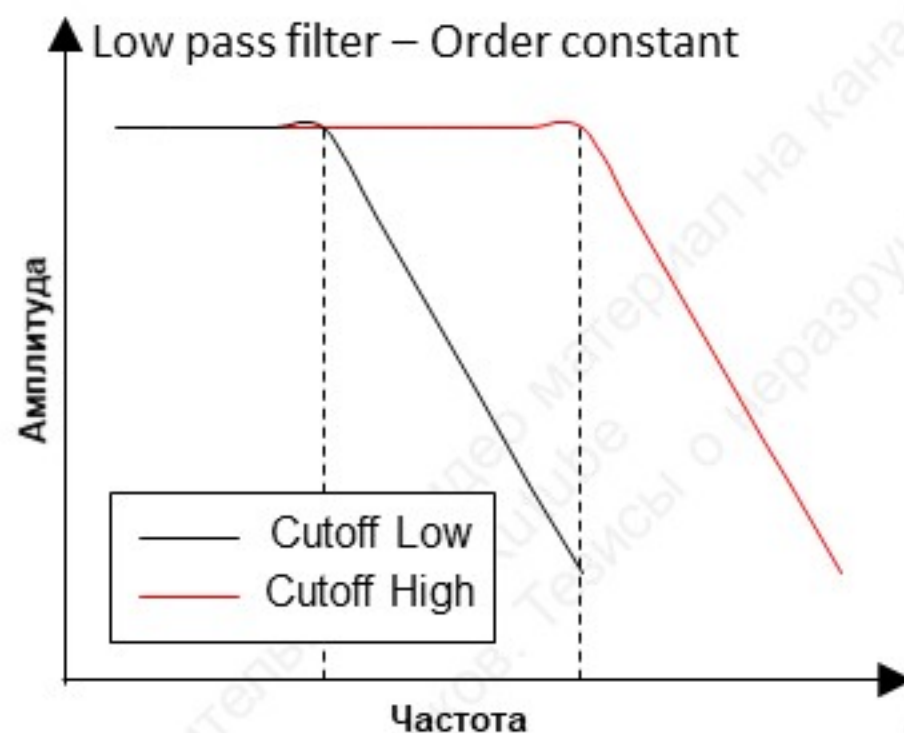
Частота выборки данных. Если протаскивать зонд слишком быстро при низкой частоте выборки, дефекты могут оказаться «между» циклами выборок и будут «пропущены». Это аналогично видеокамере, чтобы получить четкое изображение быстро движущегося объекта, нужна высокая частота кадров.

Фильтр низких частот отсекает высокочастотные шумы, делая сигнал чище. Но у фильтра ограничено время отклика. Если частота отсечения фильтра слишком низкая (для лучшего подавления шума), фильтр не будет успевать реагировать на быстрые изменения сигнала, когда зонд протаскивается с высокой скоростью. Это приведет к искажению или уменьшению амплитуды сигнала от дефектов.

Низкие частоты возбуждения передатчика зонда, используемые для контроля ферромагнитных материалов, чувствительны к низкочастотным помехам от электросетей 50/60 Гц и их гармоникам. Чтобы снизить этот эффект используют низкочастотный фильтр, который, как описано выше, ограничивает скорость протаскивания зонда.

График показывает прямую зависимость: чем выше скорость протаскивания зонда, тем больше падает амплитуда сигнала от дефекта. Падение амплитуды напрямую снижает вероятность обнаружения дефекта.

Скорость протаскивания зонда — это компромисс между скоростью и качеством данных. Скорость должна быть такой, чтобы амплитуда сигнала от калибровочного дефекта не падала ниже допустимого уровня.



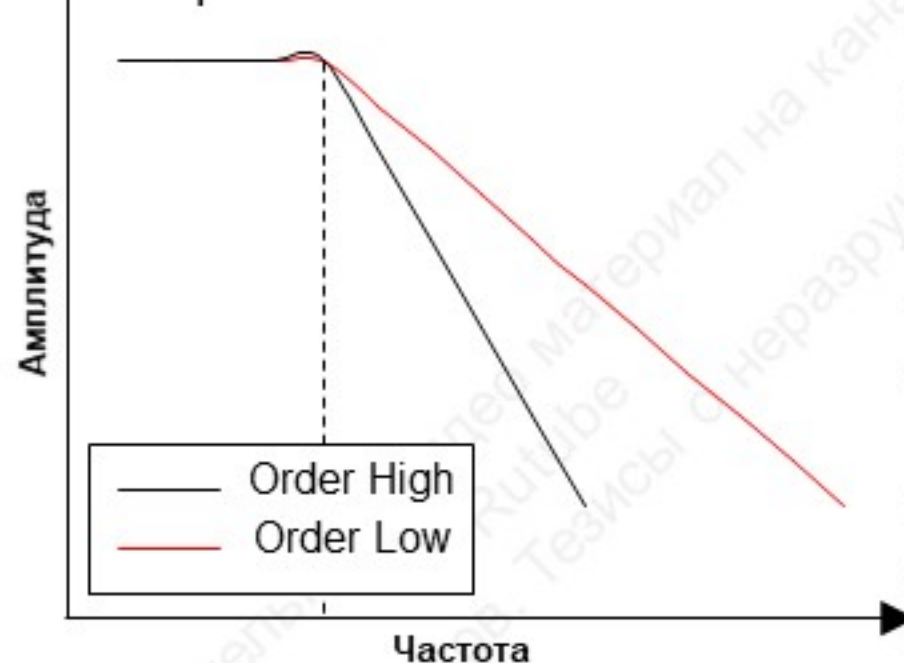
Low pass filter – это фильтр низких частот, который пропускает только низкие частоты, а высокие подавляет. Предназначен для подавления высокочастотных шумов от электросети, вибрации, высокочастотные наводки, оставляя полезный низкочастотный сигнал от дефектов. **Cutoff** – это значение пороговой частоты, за которым амплитуда сигналов начинает подавляться. Чем ниже частота отсечки (**Cutoff Low**), тем уже фильтр – сигнал становится очень чистым, но высок риск потерять полезный сигнал от мелких дефектов. Чем выше частота отсечки (**Cutoff High**), тем шире фильтр – сохраняется больше полезного сигнала, но и шум остаётся.

High pass filter – это фильтр высоких частот, который пропускает только высокие частоты, а низкие подавляет. Предназначен для очищения от сигналов с медленными изменениями (постоянной составляющей и дрейфа), которые не связаны с дефектами. Низкая частота отсечки (**Cutoff Low**) – удаляет только смещение нуля и дрейф, почти все полезные сигналы остаются. Высокая частота отсечки (**Cutoff High**) агрессивно удаляет почти все низкие частоты, но существует риск потери полезной информации о плавных изменениях толщины.

Order constant (порядок фильтра остаётся неизменным) – это когда крутизна спада амплитуды сигнала постоянная. Поэтому форма кривых похожа – они просто «сдвигаются» вправо или влево по оси частот.)



Low pass filter – Cutoff constant



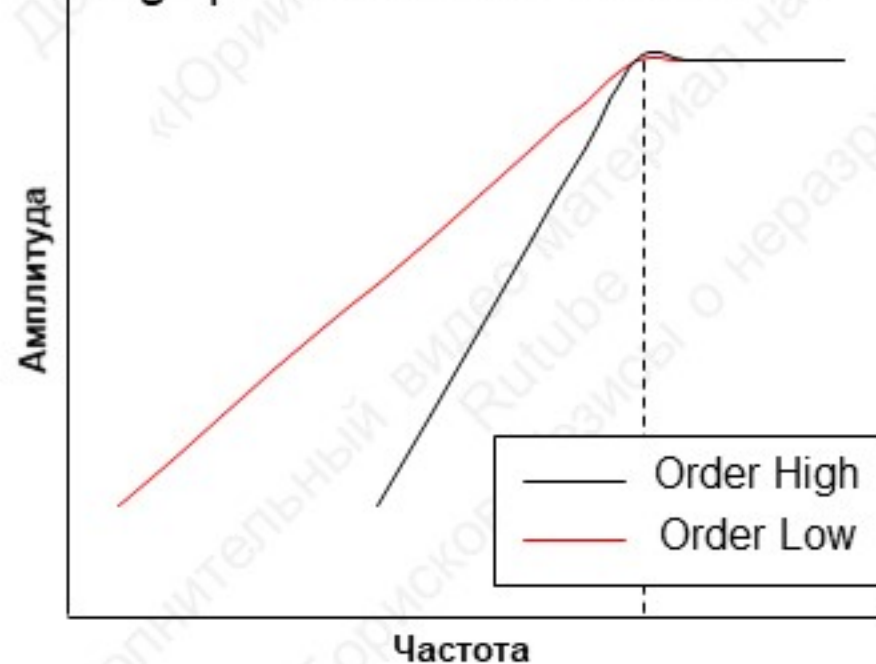
Low pass filter – это фильтр низких частот, который пропускает только низкие частоты, а высокие подавляет. Предназначен для подавления высокочастотных шумов (от электросети, вибрации, наводки), оставляя полезный низкочастотный сигнал от дефектов.

Cutoff – это значение пороговой частоты, за которым амплитуда сигналов начинает подавляться. При неизменном значении пороговой частоты (**Cutoff Constant**):

- **Order High** (высокий порядок фильтрации) — это очень резкое отсечение высоких частот после значения пороговой частоты. Это подходит, когда шум и полезный сигнал хорошо разделены по частотам;

- **Order Low** (низкий порядок фильтрации) — это плавное отсечение высоких частот, когда шум и полезный сигнал пересекаются по частотным характеристикам.

High pass filter – Cutoff constant

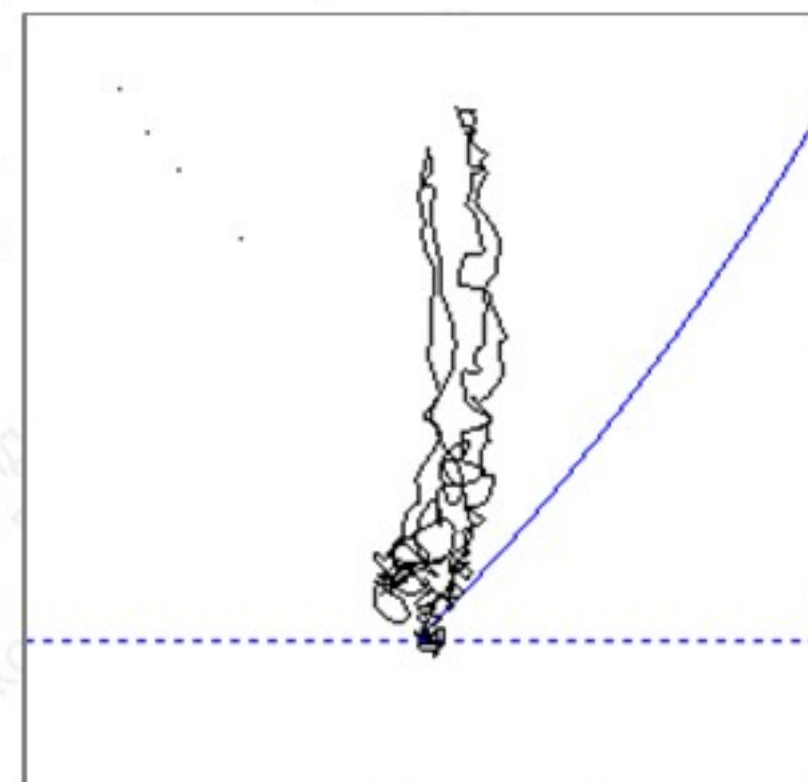


High pass filter – это фильтр высоких частот, который пропускает только высокие частоты, а низкие подавляет. Предназначен для очищения от сигналов с медленными изменениями (постоянной составляющей и дрейфа), которые не связаны с дефектами. При неизменном значении пороговой частоты (**Cutoff Constant**):

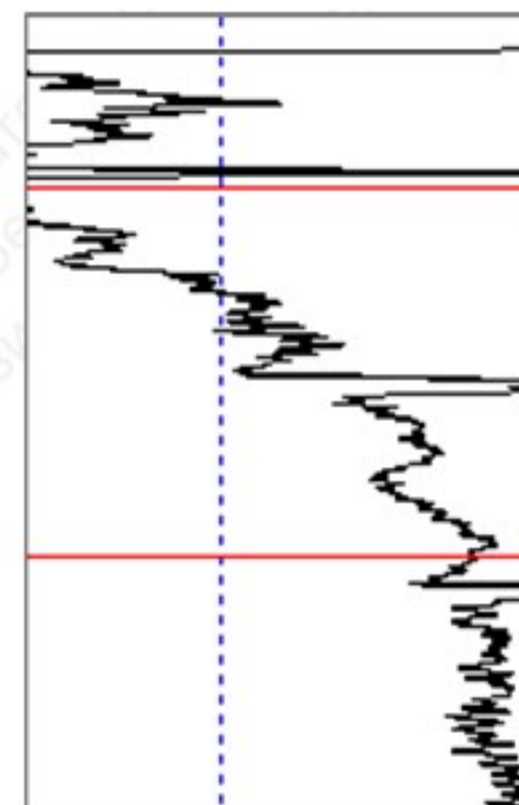
- **Order High** (высокий порядок фильтрации) — очень резкое отсечение низких частот ниже частоты среза, эффективно для удаления постоянного смещения и стабильных низкочастотных помех.

- **Order Low** (низкий порядок фильтрации) — это плавное отсечение низких частот, которое используется, когда нежелательно резко отсекал сигнал, например, при плавных изменениях толщины трубы.

Сырой сигнал



Сырой сигнал



Low pass filter (Фильтр низких частот) использовать когда дефект имеет более низкую частоту, чем шум; когда сигнал от дефекта содержит волнистость - медленные, низкочастотные колебания сигнала, характерные для некоторых типов дефектов.

High pass filter (Фильтр высоких частот) использовать, когда дефект имеет более высокую частоту, чем шум; когда требуется удалить постоянную составляющую (DC offset)* из сигнала.

На практике часто используется High pass filter, так как основные технологические шумы (электромагнитные наводки, шум от трения) в объекте контроля часто являются выше частотой по отношению к полезному сигналу от дефектов типа коррозии или трещин.

Отличие частотных характеристик сигналов от дефектов и шума — это ключевой навык оператора. Различие определяется по сигналам от искусственных дефектов известного размера и на бездефектном участке калибровочной трубы.

Определение частоты шумового сигнала для его фильтрации. Если позволяет ПО системы RFT:

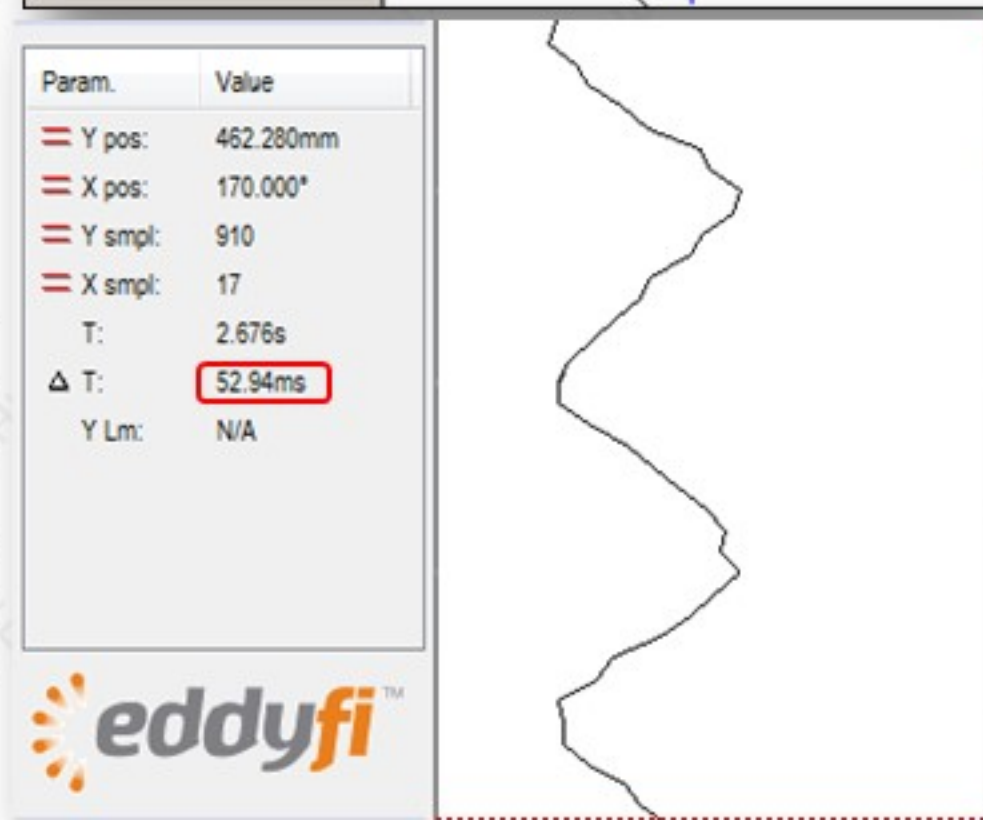
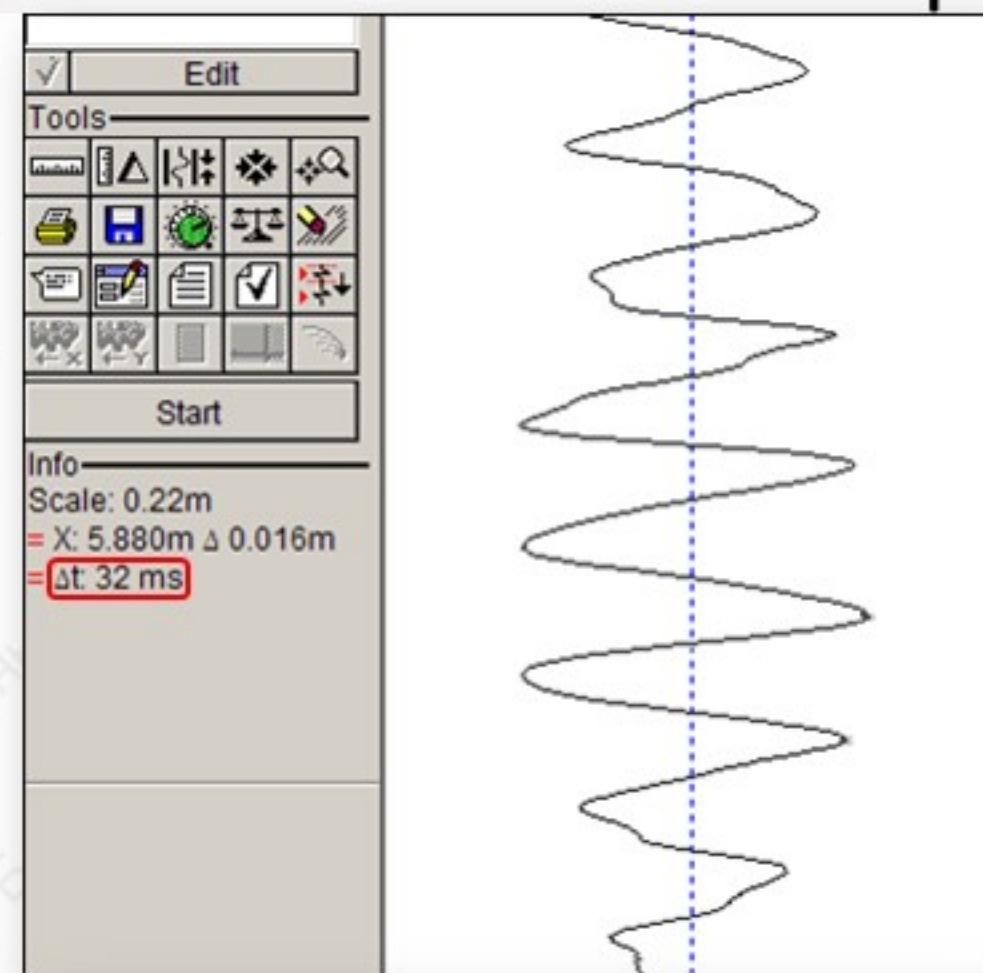
- увеличить масштаб шумового сигнала, который требуется отфильтровать;
- установить границы курсора на 2 последовательных максимума (пики) сигнала;
- считать значение времени в разделе информации о сигнале;

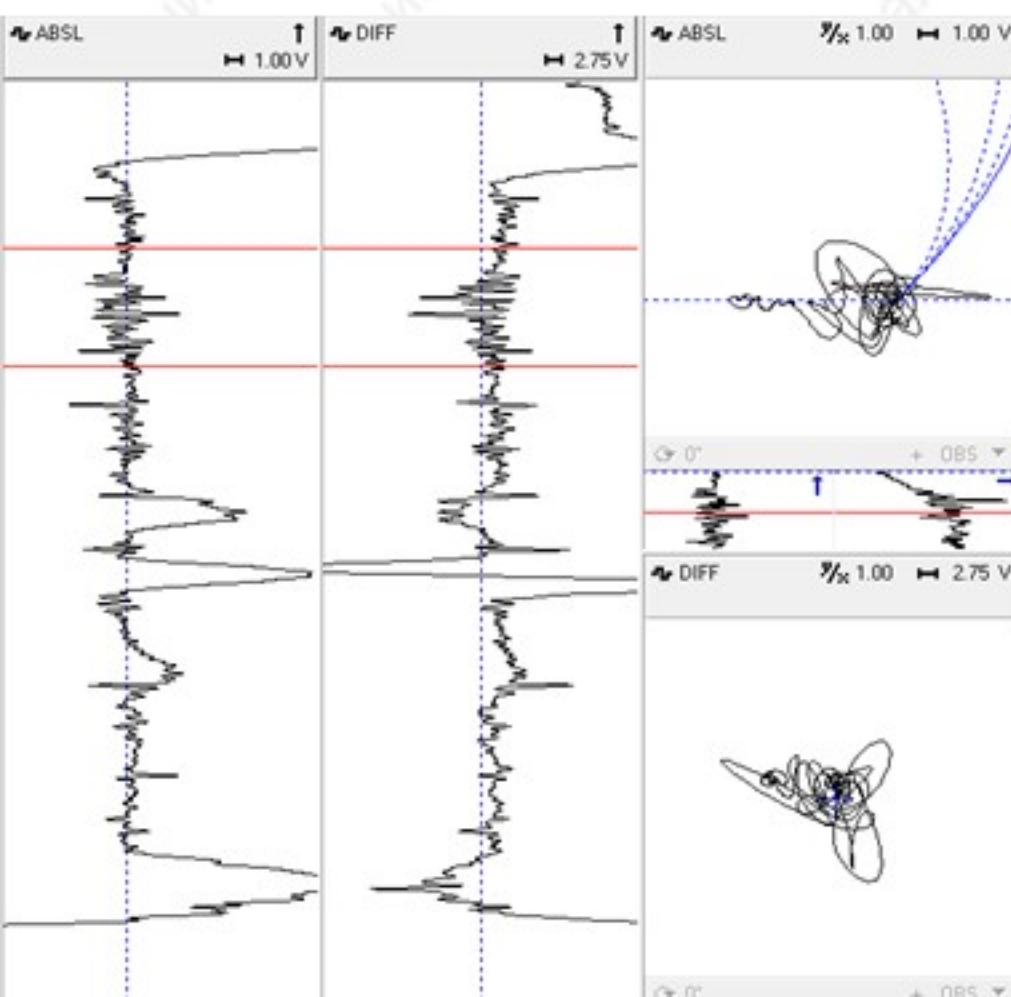
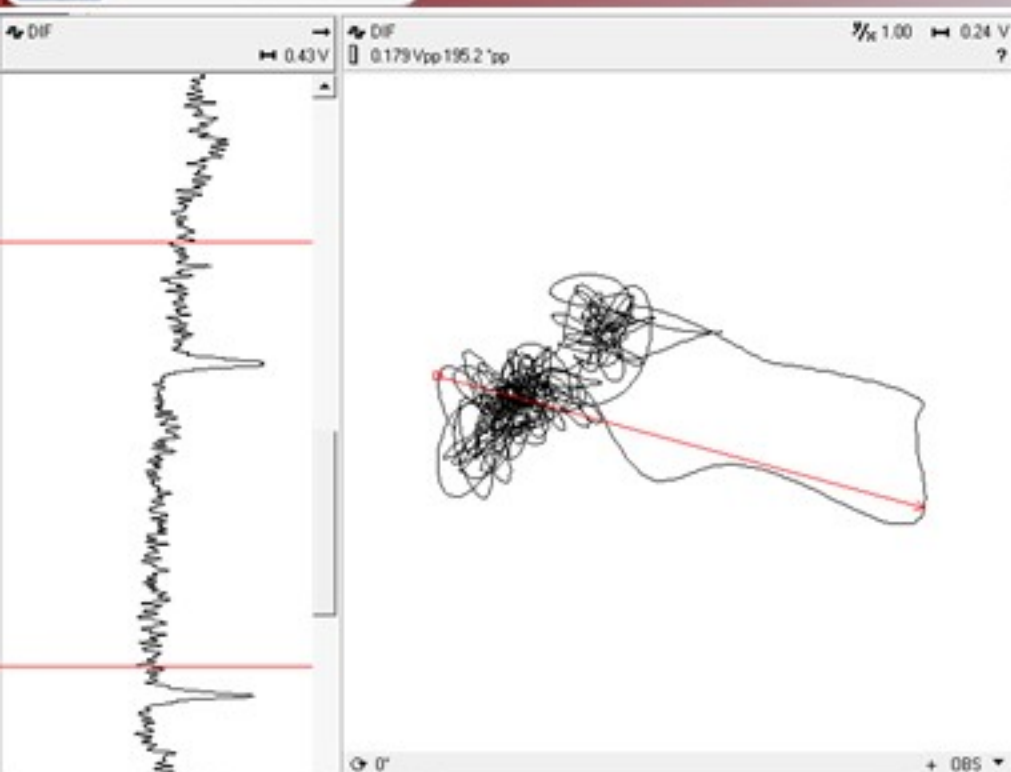
Частота сигнала рассчитывается:

$$f = \frac{1}{\text{время периода сигнала}}$$

На верхнем примере частота сигнала, который нужно отфильтровать, составляет 31 Гц. На нижнем примере 19 Гц.

Это практическое наставление, как определить частоту характерного шумового сигнала. Если в сигнале содержится периодический шум (например, помехи от электросети или от трения), можно измерить период шума и рассчитать частоту шума. Затем настроить Low pass фильтр (низкочастотного фильтра) так, чтобы частотная отсечка была ниже рассчитанной величины. Это подавит данный шум.





Высокочастотный шум образовывается из-за слишком высокой частотной отсечки Low-Pass (низкочастотного фильтра). Фильтр становится слишком «пропускающим» и не отсекает высокочастотные помехи, например, вызванных внешним электромагнитным источником.

Чтобы устранить шум, уменьшить частотную отсечку в системе RFT.

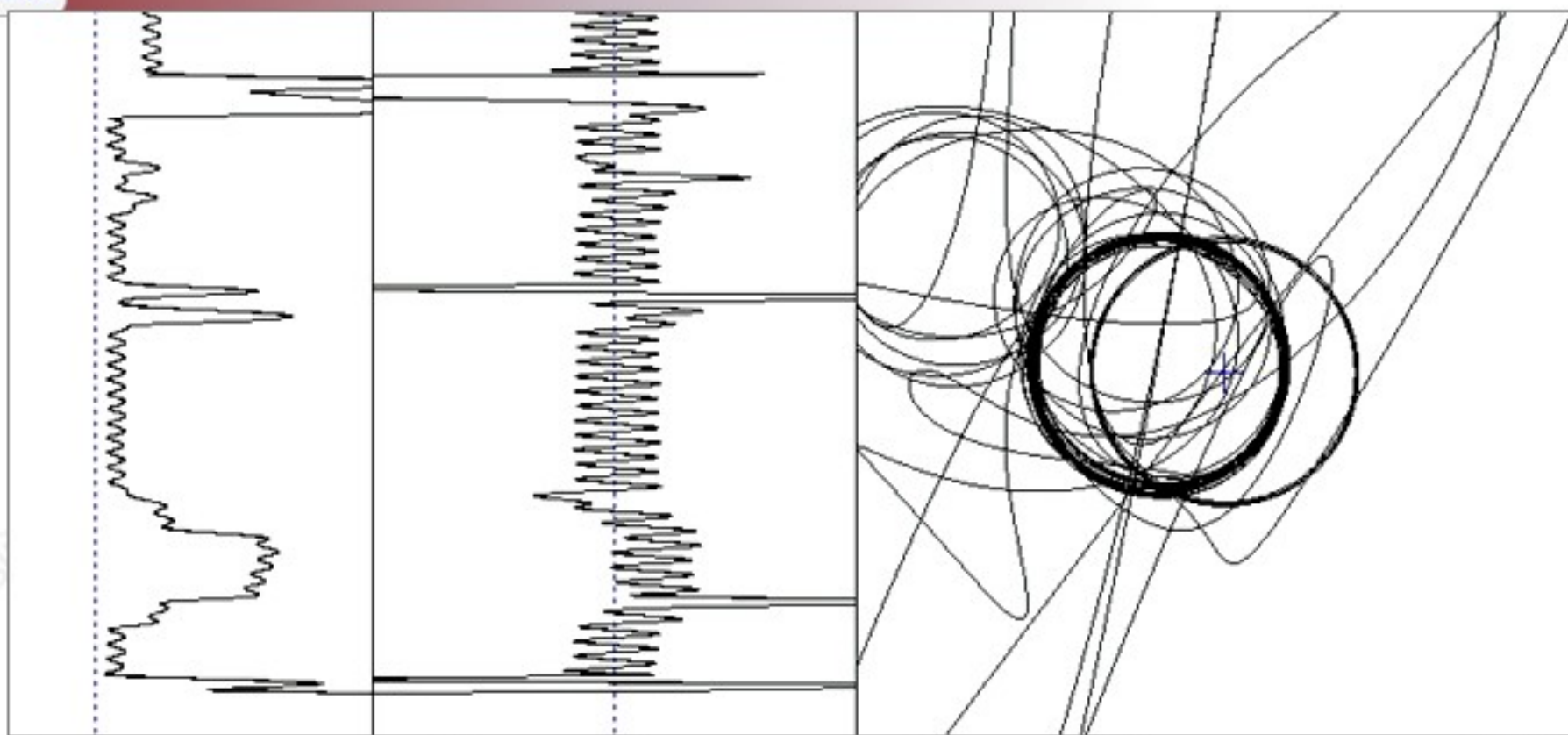
Добавьте программный фильтр (после получения данных).

Случайный шум может образовываться из-за:

- плохого заземления, которое создаёт контур для прохождения паразитных токов;
- перенасыщения сигнала в результате высокого усиления;
- слишком высокой скорости протаскивания зонда, которая «размазывает» сигнал дефекта и создаёт дополнительные высокочастотные помехи.
- напряжение, вызванное трением (трибоэлектричество*) зонда, когда внутри трубки присутствуют отложения, накипь.

Устранить шум — сначала ликвидировав физические причины: скорость протаскивания зонда, заземление, очистка трубок от отложений, а затем добавив Low-Pass фильтр для подавления оставшихся высокочастотных составляющих этого шума.

**Трибоэлектричество — это эффект возникновения электрического заряда при трении зонда о внутреннюю поверхность трубки, особенно усиливающийся при наличии отложений.*



Круговой шум — это специфический и очень характерный вид шума в RFT и вихретоковом контроле. Он появляется от сети переменного тока (50 Гц в России/Европе, 60 Гц в США). Электромагнитные поля от сети и её гармоник (100 Гц, 150 Гц, 200 Гц и т.д.) наводятся на чувствительные катушки зонда.

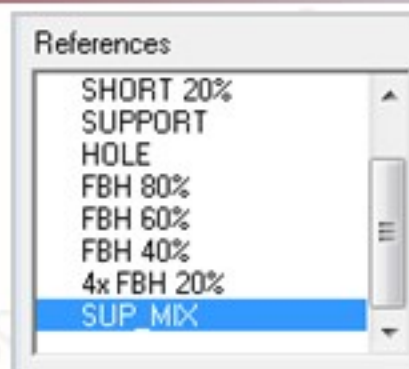
На комплексной плоскости этот шум выглядит, как окружность, наложенная на полезный сигнал от дефектов. На полосовом графике этот шум может проявляться, как низкочастотные синусоидальные колебания.

Решение 1 (Упреждающее): Самый эффективный метод — изменить частоту зонда так, чтобы она не совпадала и не была близка к гармоникам сетевой частоты. Это предотвращает саму возможность резонансной наводки (см. страницу 36).

Решение 2 (Фильтрация): Если изменить частоту возбуждения невозможно, можно подавить шум с помощью Low pass фильтра (низкочастотного фильтра), установив частотную отсечку ниже, чем частота этой сетевой гармоники.



Смешивание каналов. Mix



Канал MIX обычно используется для подавления нежелательных сигналов (таких как TSP сигнал от опорной плиты), с сохранением сигналов от дефектов.

Требуется два канала с высокой и низкой частотами и эталонный TSP сигнал с калибровочной трубки.

Во время калибровки происходит измерение эталонного TSP сигнала от опорной плиты (SUP_MIX / SUPPORT).

Программное обеспечение регулирует усиление (gain) и фазу (rotation) второго канала, чтобы согласовать его сигнал с сигналом первого канала.

Один из другого сигналы вычитаются, чтобы создать канал DIF_MIX (разностный канал смешения).

Смешение каналов (MIX) обычно используют с DIFF каналами, но эту технику также можно использовать и для ABS каналов.

MIX-канал — это хороший инструмент для выборочного подавления мешающих факторов. Самый частый сигнал для подавления - от опорных плит (TSP сигнал), который является постоянным и известным. MIX-канал позволяет практически полностью подавить сильный фон TSP сигнала, чтобы увидеть сигналы от дефектов, скрытых этим фоном.

Принцип работы основан на том, что разные частоты по-разному реагируют на одни и те же объекты. Если вычесть один из другого сигналы двух частот, это скомпенсирует (обнулит) сигнал от известной помехи (TSP сигнал), в то время как сигнал от дефекта останется.





Смешивание каналов. Mix

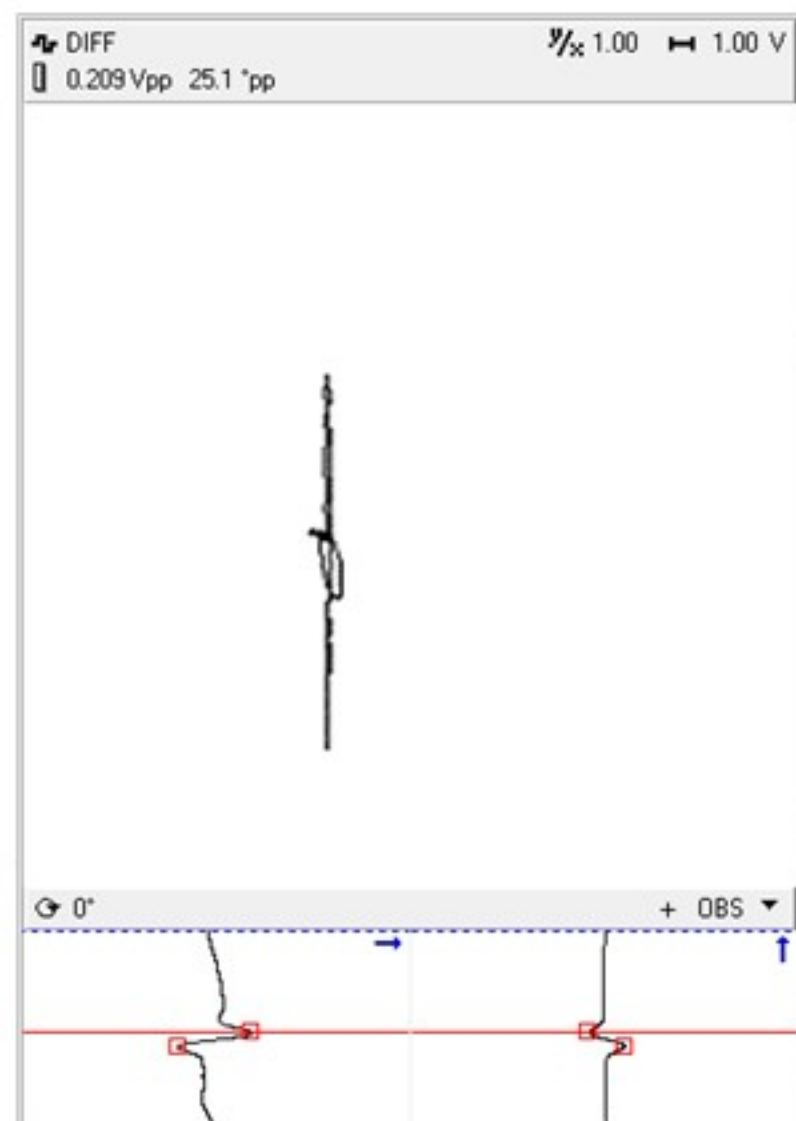
Для примера использовалась калибровочная трубка чтобы показать эффект подавления сигнала от опорной плиты (TSP сигнал):

DIF channel: видны сигналы от эталонного отверстия (hole) и от опорной плиты (TSP сигнал);

DIF_MIX channel: TSP сигнал практически полностью подавлен, а сигнал от отверстия остается четким.

Однако, во время контроля реальных объектов эффективность MIX-канала может отличаться от приведённого примера, потому что:

- материал контролируемой трубки может отличаться от калибровочной (толщина, магнитная проницаемость, электропроводность);
- материал и толщина реальной опорной плиты (TSP) могут быть разными (замена, ремонт и т.п.);
- соседние трубки в пучке могут создавать дополнительное затухание сигнала.



Идеальная калибровка на калибровочной трубке не гарантирует идеальных результатов в реальных условиях. В реальном теплообменнике трубы стареют, покрываются отложениями, их свойства меняются. Опорные плиты также могут быть разными. Эти изменения влияют на электромагнитные свойства системы, из-за чего заранее настроенное смешение каналов в MIX-канале становится неидеальным. Поэтому в канале DIF_MIX может остаться небольшой остаточный TSP сигнал, который нужно уметь отличать от сигналов дефектов.

Ключевые наставления для практики

- заземлить систему RFT, чтобы снизить уровень шума.
- убедиться в правильном использовании частоты выборки данных и полосы пропускания фильтра.
- следить за сигналом: если сигнал становится зашумленным, уменьшить скорость протаскивания зонда.

Для стандартной настройки с тремя каналами, две частоты и канал микс:

- создать канал и выбрать частоту возбуждения передатчика в зонде;
- выполнить частотную компенсацию;
- создать второй канал и установить вторую частоту возбуждения передатчика зонда в два раза меньше первого канала; вторая частота помогает избежать интерференции и упрощает интерпретацию.
- настроить параметры канала микс на TSP сигнале (от трубной решётки или опорной плиты).





Введение в метод контроля дальним полем RFT