



Девятая Международная научно-техническая конференция  
МНТК-2014

"БЕЗОПАСНОСТЬ, ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭКОНОМИКА  
АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ"

Москва, 21-23 мая 2014 года

# ДВУХПАРАМЕТРОВЫЙ КРИТЕРИЙ ГЛУШЕНИЯ ТРУБ В ПАРОГЕНЕРАТОРАХ АЭС С ВВЭР

*Лунин В.П., Жданов А.Г., Чегодаев В.В.  
НИУ «МЭИ», Москва*

*Ловчев В.Н., Гуцев Д.Ф., Храмова Е.С.  
ОАО Концерн «РосЭнергоАтом»*

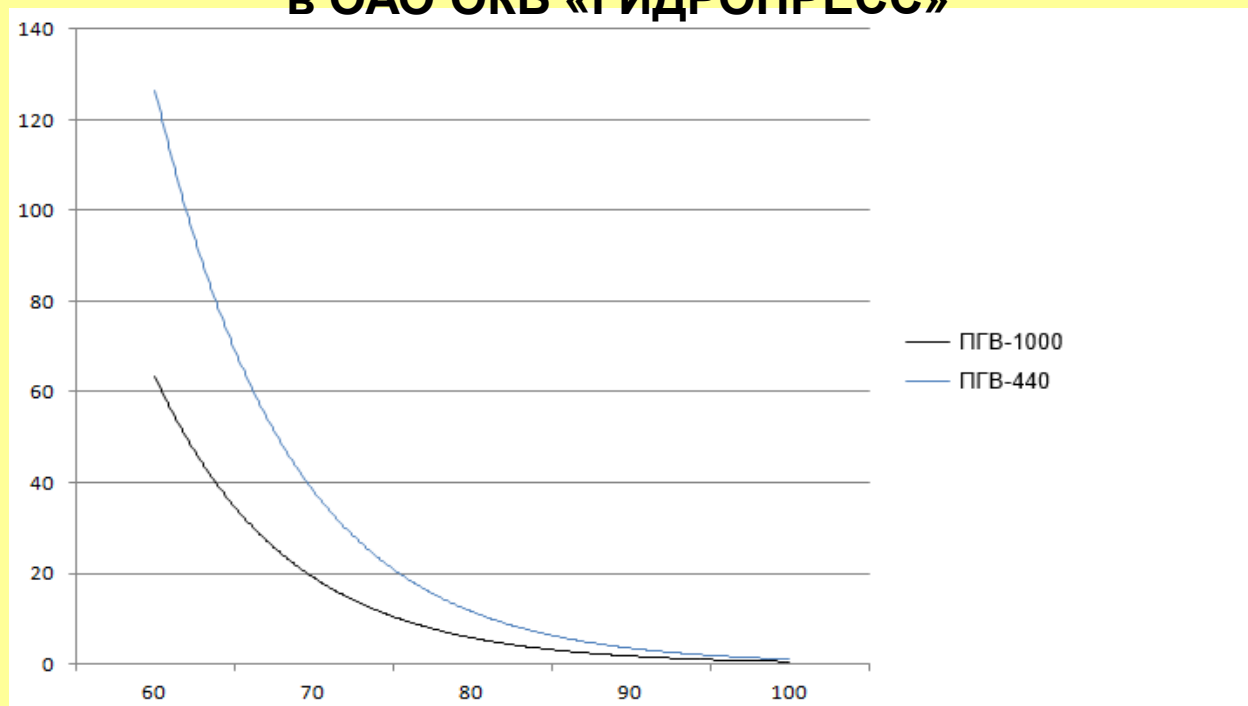
*Жуков Р.Ю. ОАО ОКБ «Гидропресс»*





## Постановка задачи двухпараметрового критерия глушения ТОТ

Кривые допустимых дефектов ТОТ при гидроиспытаниях, полученные в ОАО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»



Источник:

В.А. Григорьев, В.В. Уланов, А.А. Шубин, Н.Б. Трунов, С.Е. Давиденко, В.В. Денисов  
**ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ВИХРЕТОКОВОМУ КОНТРОЛЮ  
ТЕПЛООБМЕННЫХ ТРУБ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ.**  
Материалы 7-го межд. сем. по гор. парогенераторам, Россия, Подольск, 2006



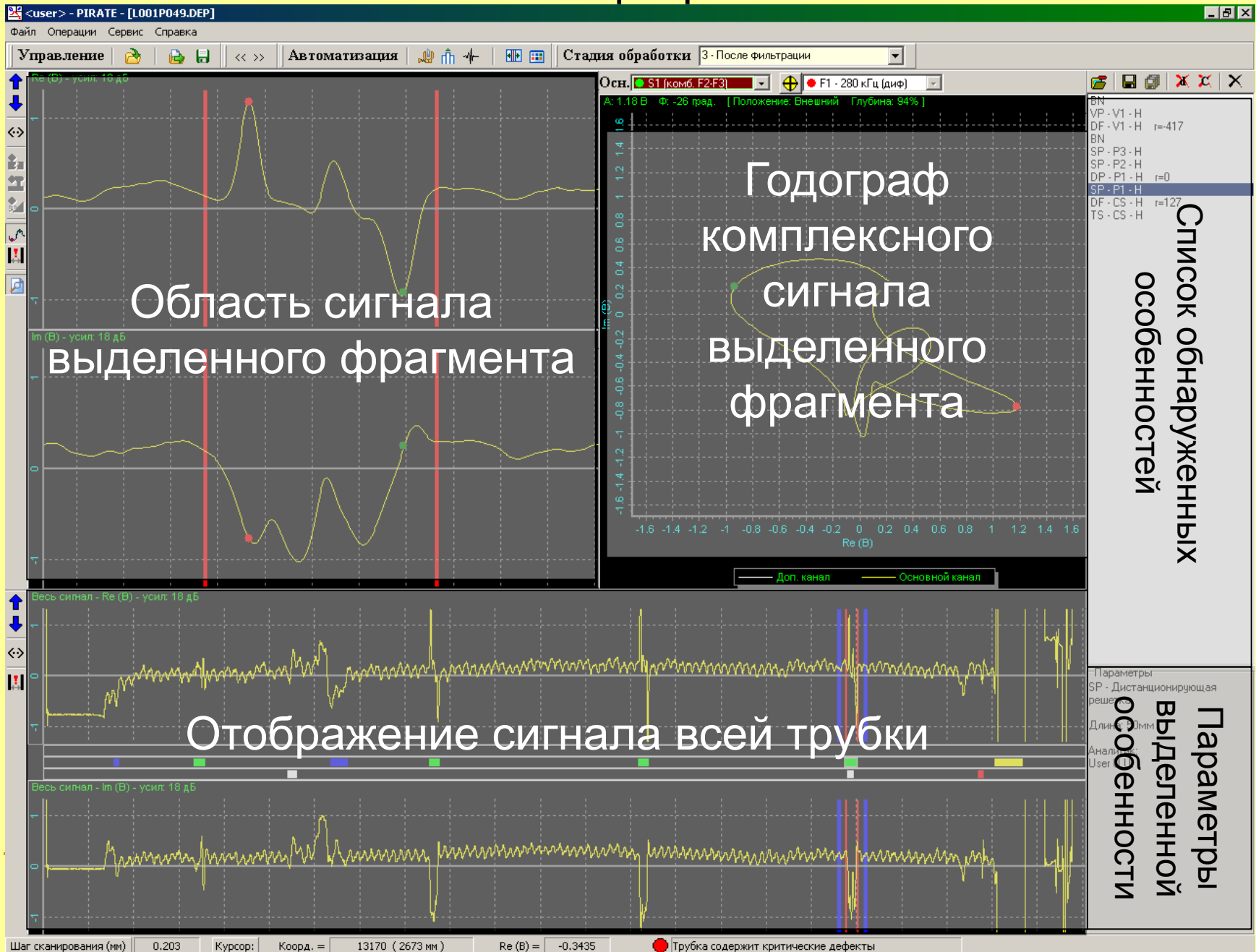


## СОДЕРЖАНИЕ

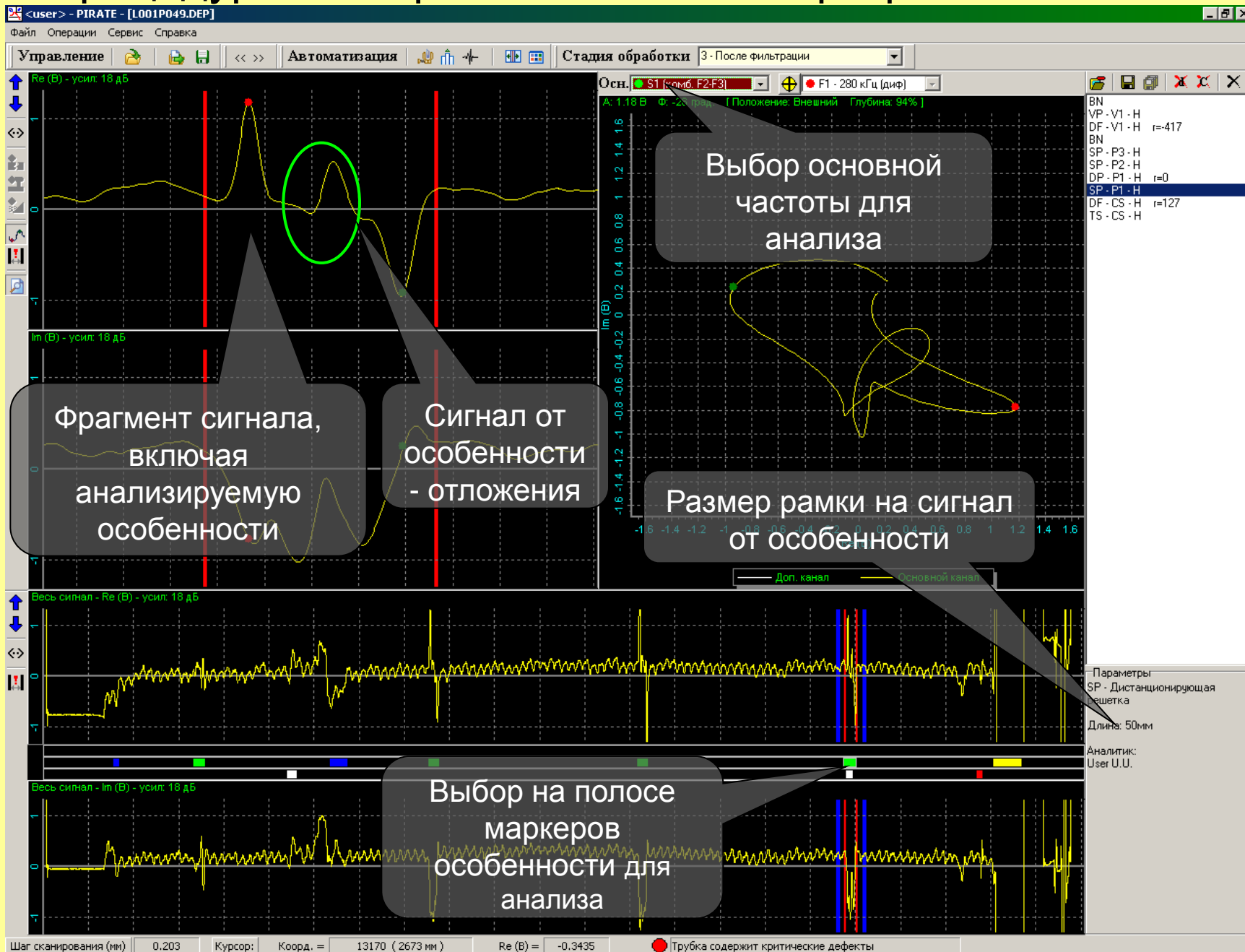
- 1. Исследование данных эксплуатационного ВТК парогенераторов ВВЭР-440**
- 2. Исследование данных эксплуатационного ВТК парогенераторов ВВЭР-1000**
- 3. Численное моделирование вихретоковых сигналов от дефектов ТОТ**
- 4. Обоснование выбора параметров амплитудного критерия**
- 5. Тестовые испытания амплитудного критерия**



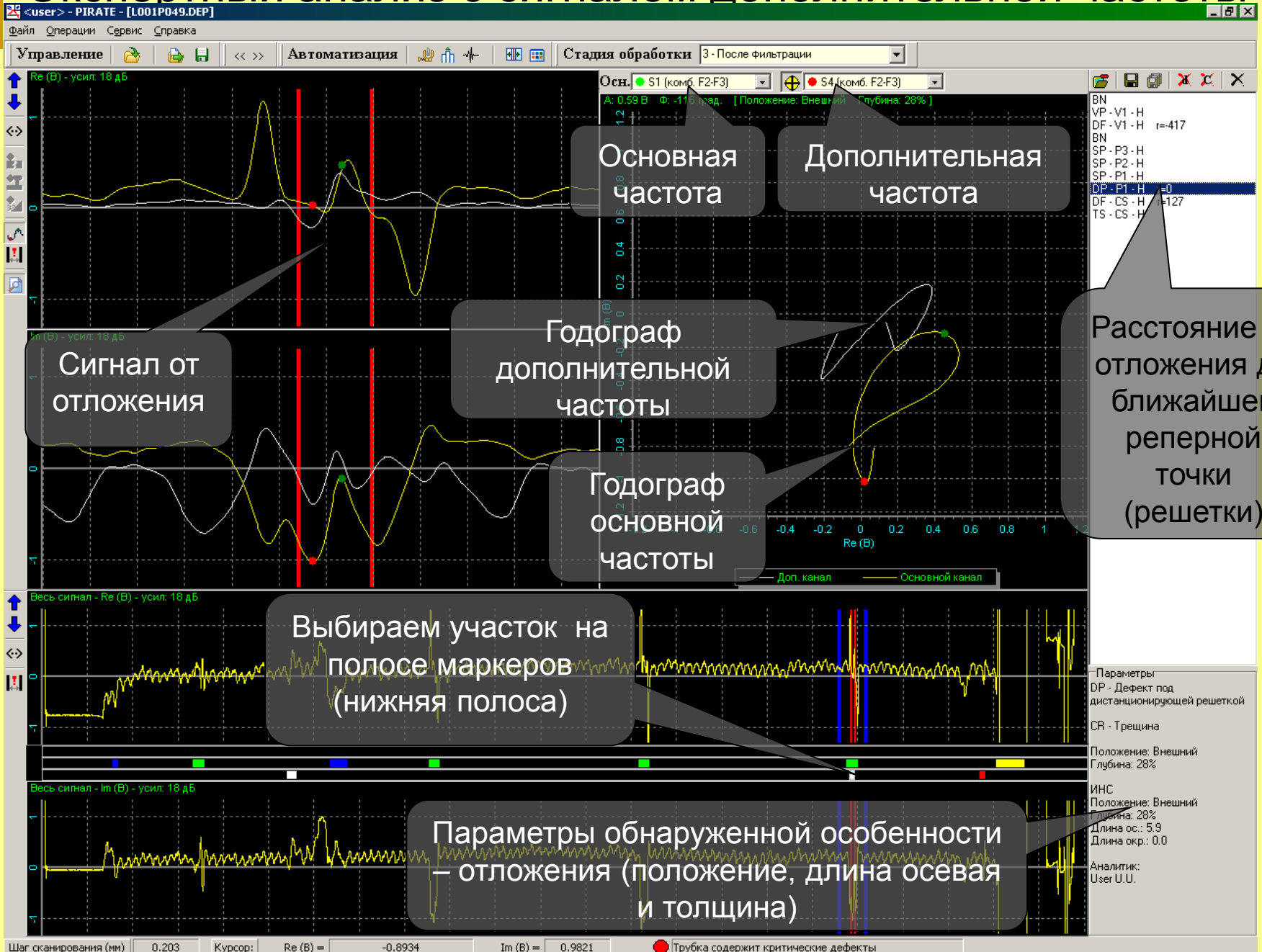
# Рабочее окно программы PIRATE



# Процедура экспертного анализа в программе PIRATE



# Экспертный анализ с сигналом дополнительной частоты



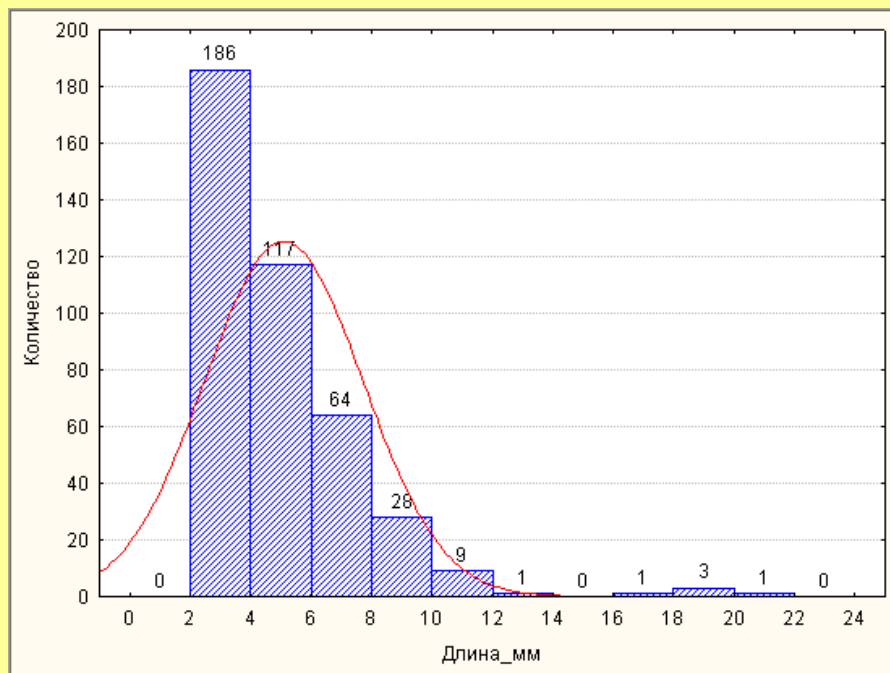


## Состав базы для анализа сигналов

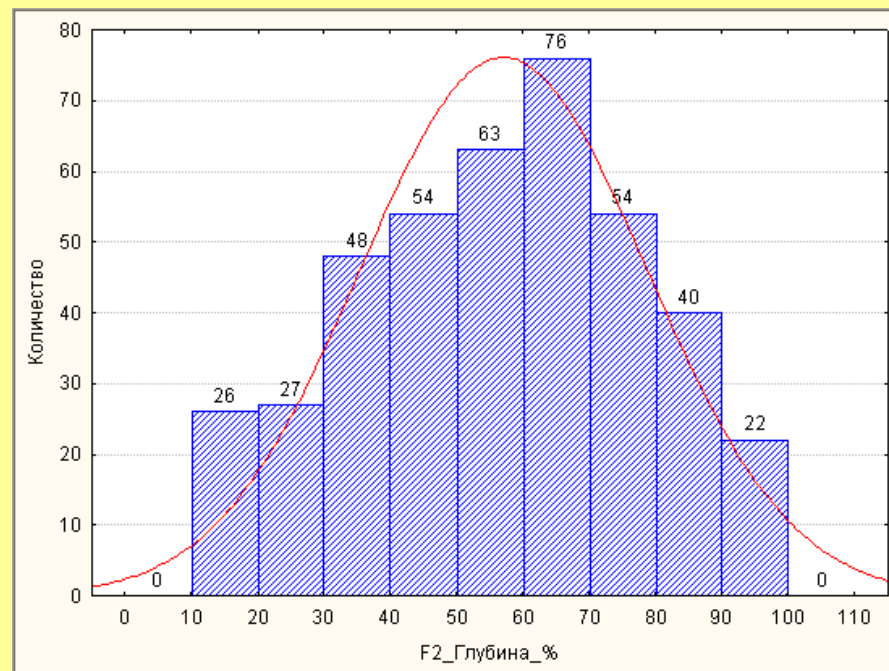
Параметр	Количество	Количество на трубку
Всего трубок	1397	
Всего лотов	25	
Выявлено индикаций в автоматическом режиме	4247	~3.04
Выбрано индикаций для анализа (только те, глубина которых была определена)	600	~0.43
Признано "ложными" индикаций	3647	~2.61



## Анализ статистических распределений по параметрам дефектов



*по длине*

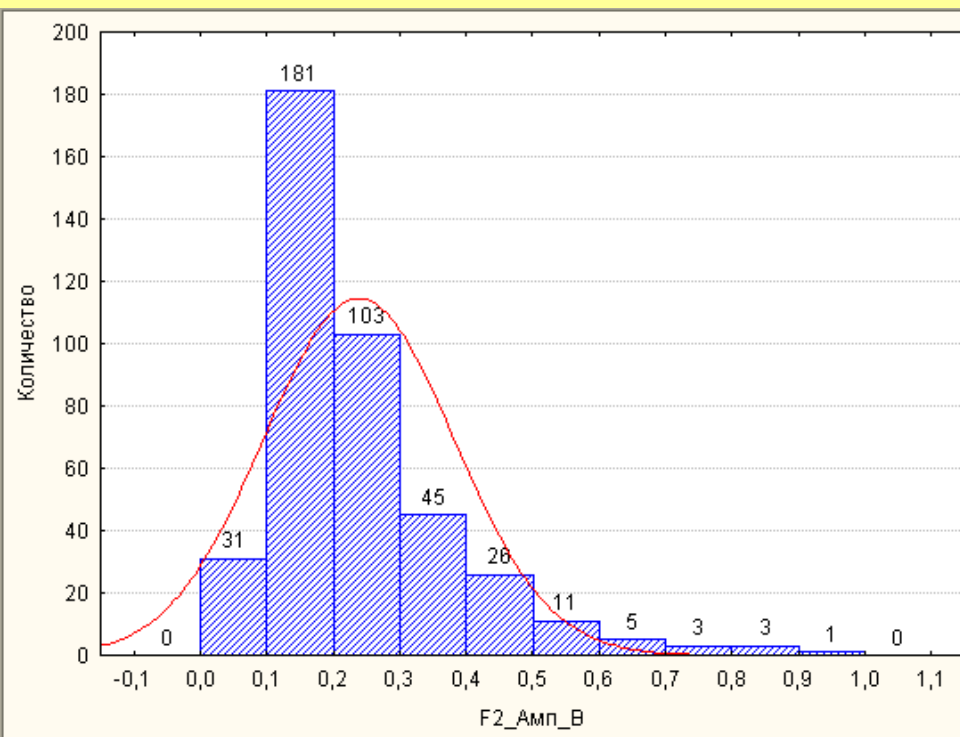


*по глубине*

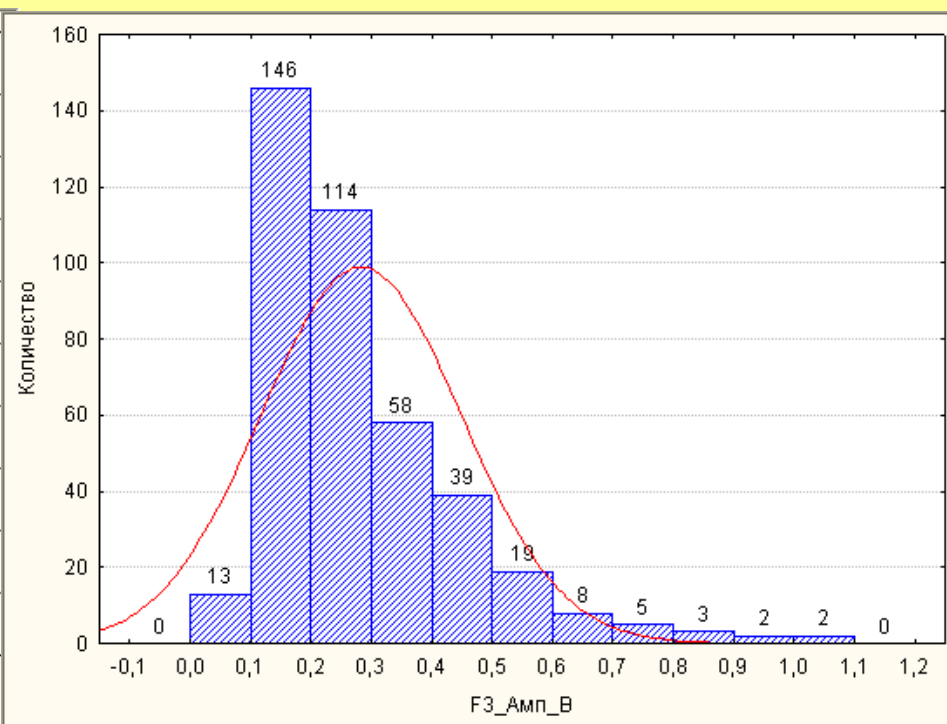




## Анализ статистических распределений амплитуд сигналов



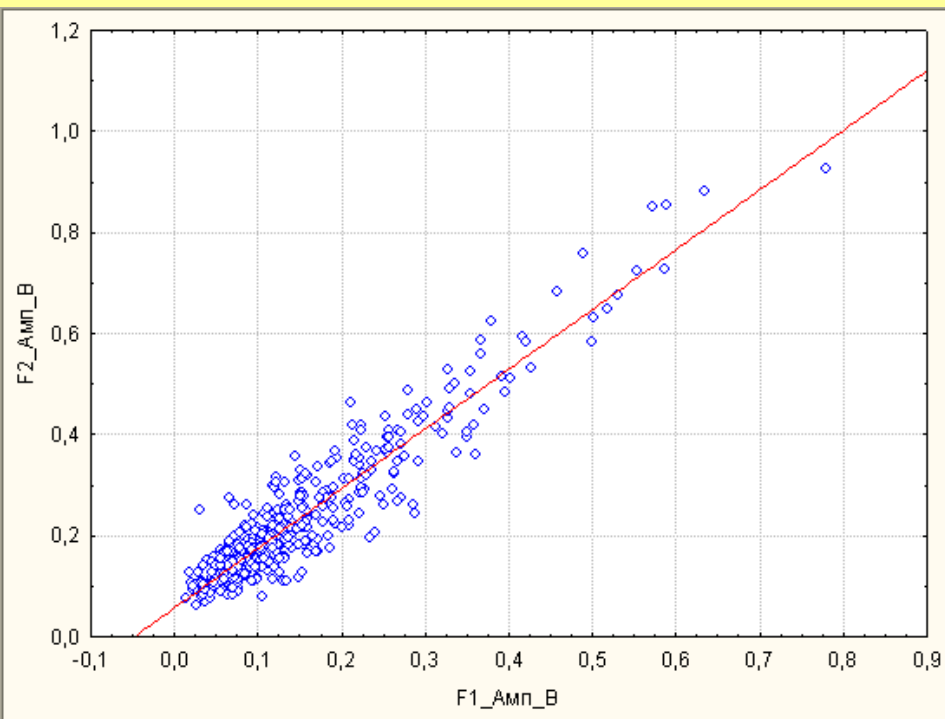
**на частоте 130 кГц**



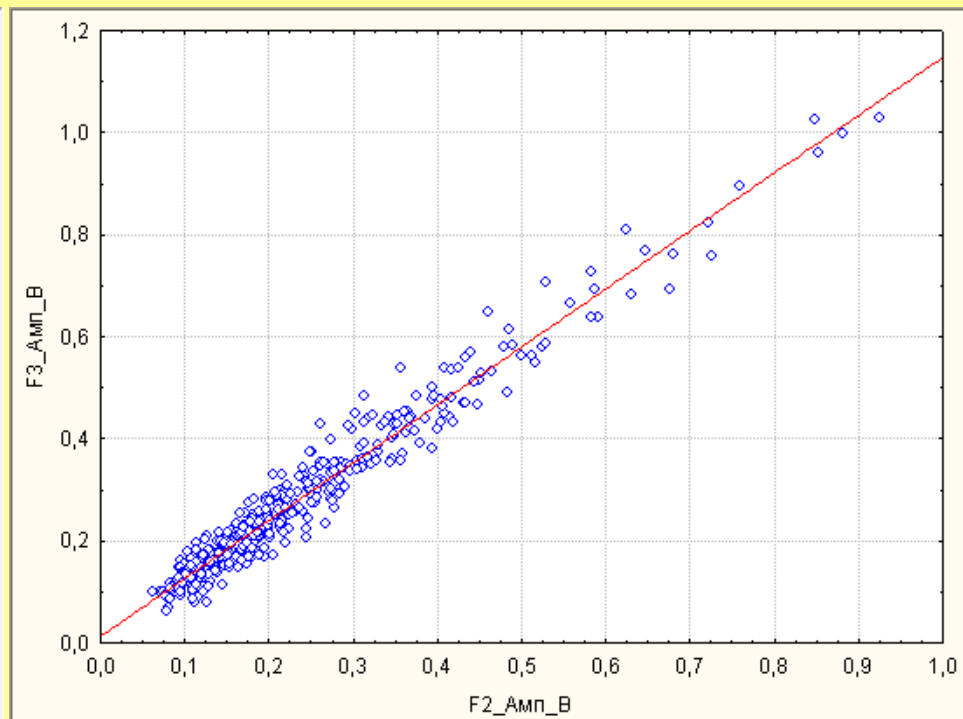
**на частоте 60 кГц**



## Взаимная зависимость амплитуд сигналов на разных частотах



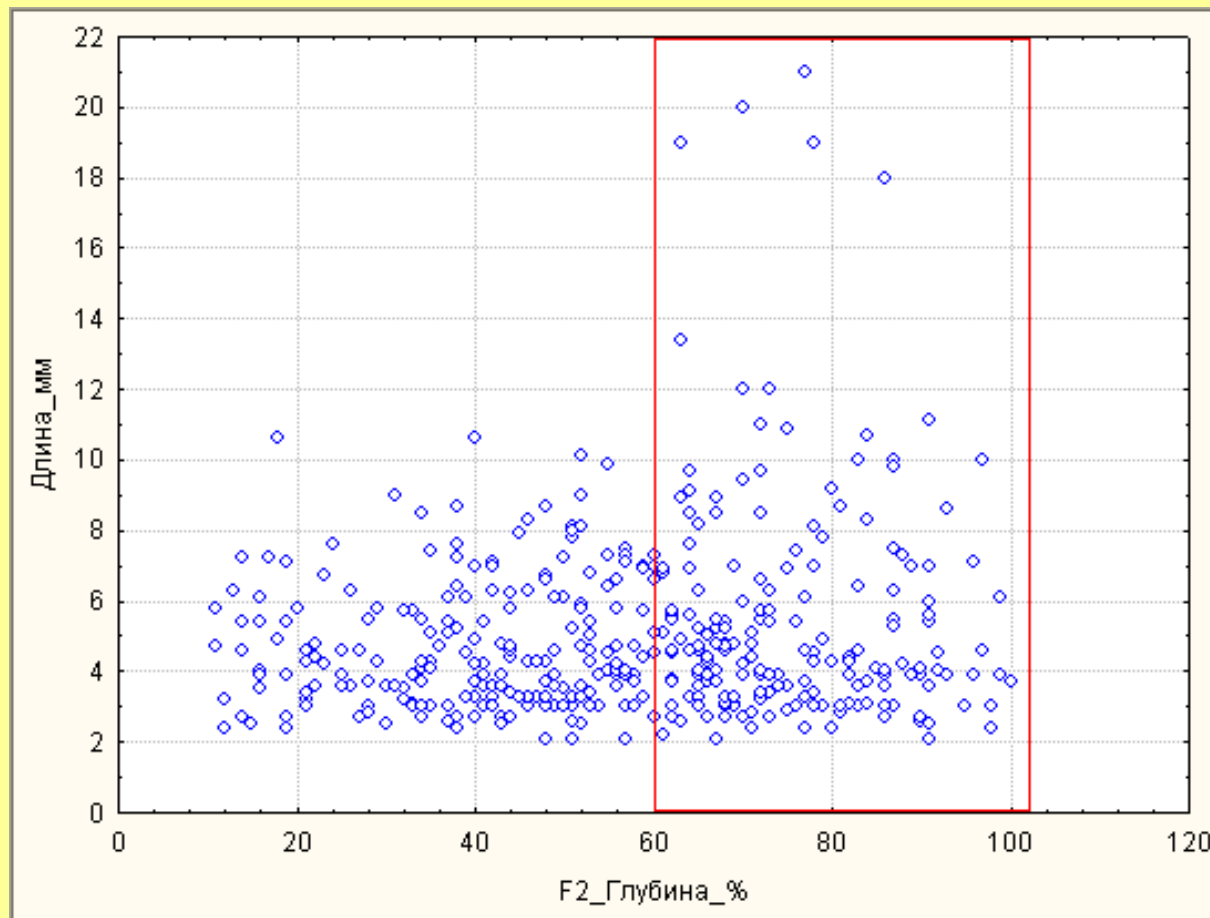
*на частотах 130 и 280 кГц*



*на частотах 130 и 60 кГц*



## Распределение дефектов в координатах глубина-длина

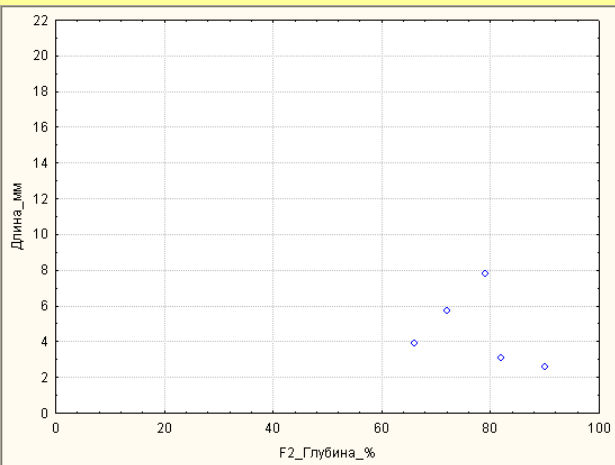


*отмечена зона опасных дефектов, которые имеют большую глубину*

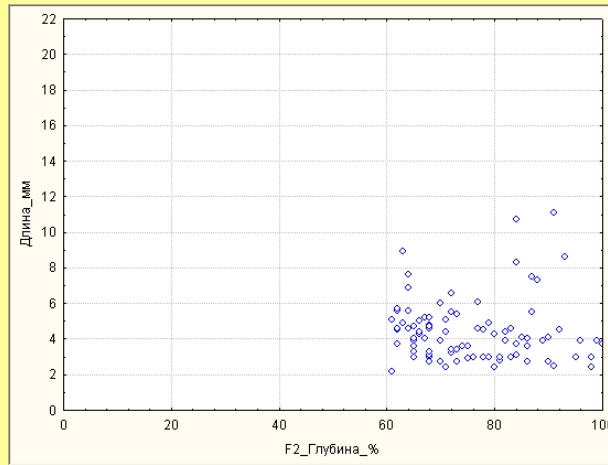


# Исследование данных эксплуатационного ВТК ПГ ВВЭР-440

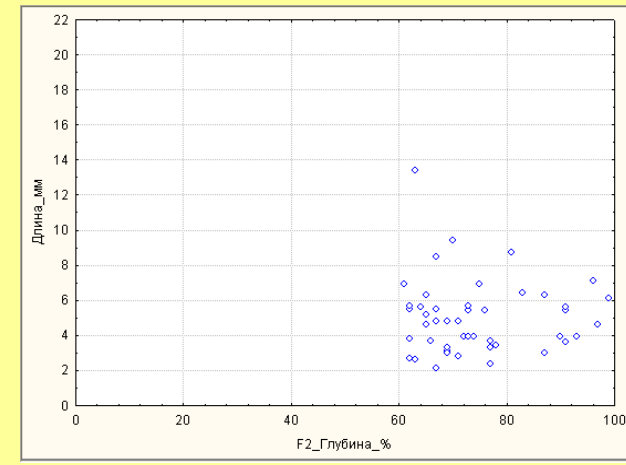
## Распределение опасных дефектов в координатах глубина-длина амплитудой



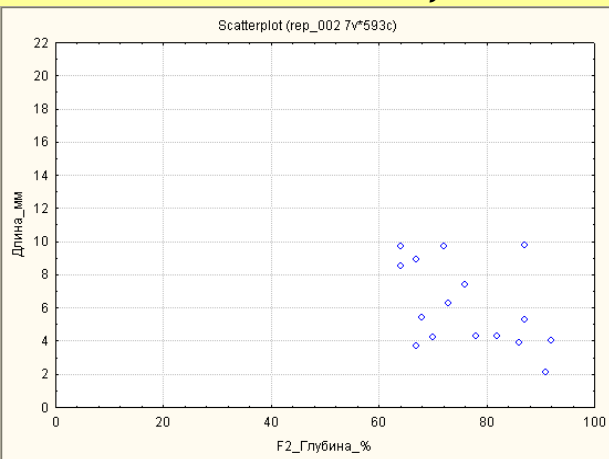
**меньше 0,1 В**



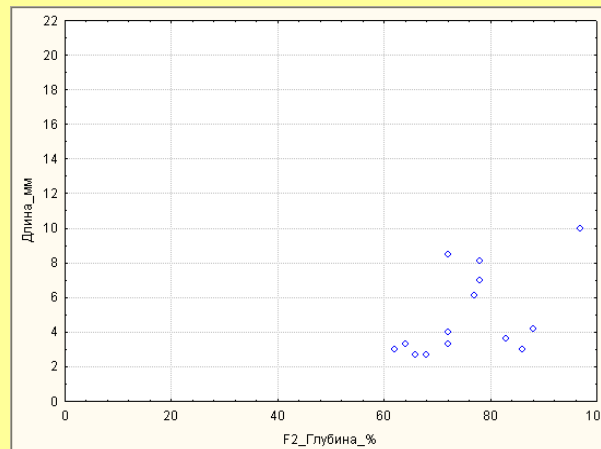
**0,1 - 0,2 В**



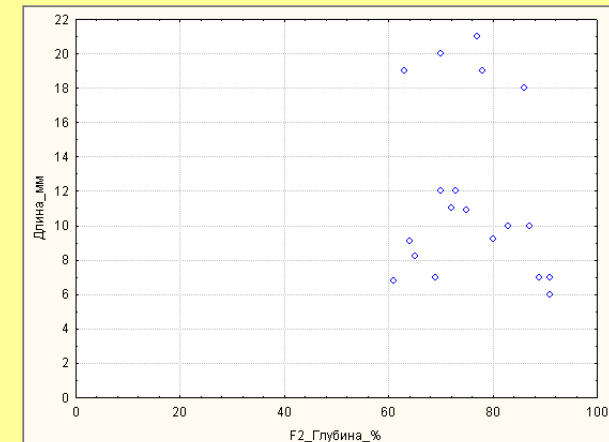
**0,2 - 0,3 В**



**0,3 - 0,4 В**



**0,4 - 0,5 В**



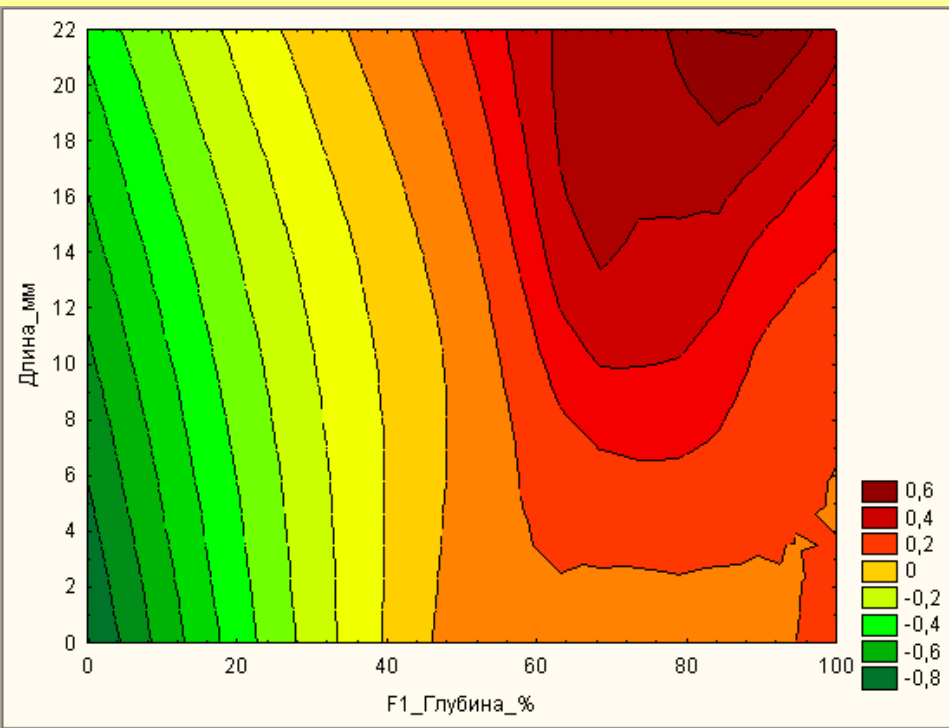
**больше 0,5 В**



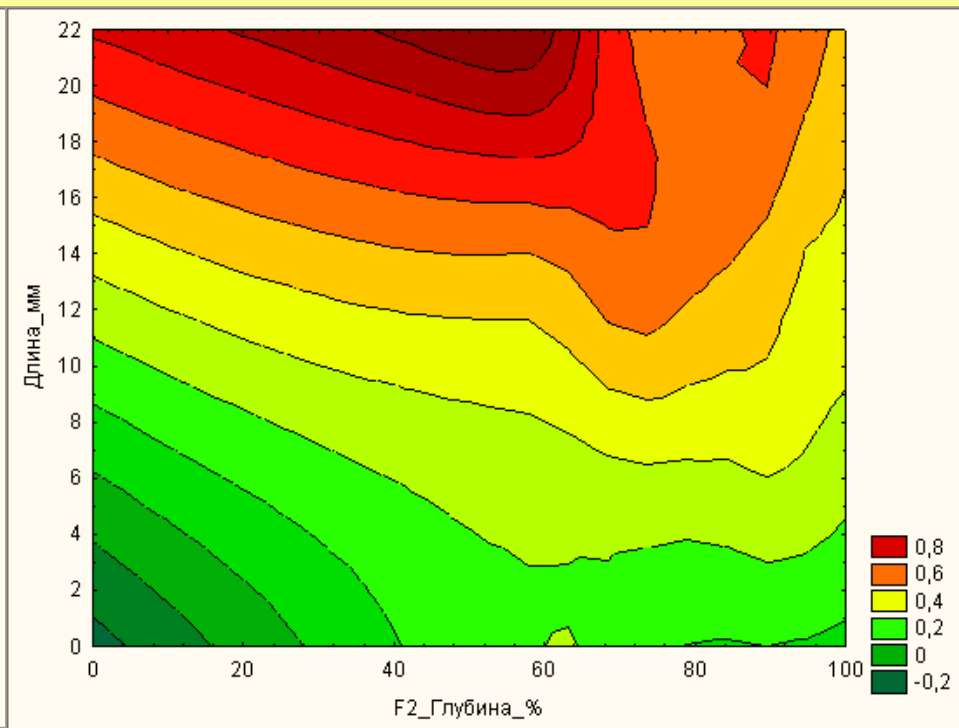


# Исследование данных эксплуатационного ВТК ПГ ВВЭР-440

## Двумерные распределения амплитуд сигналов в координатах длина-глубина



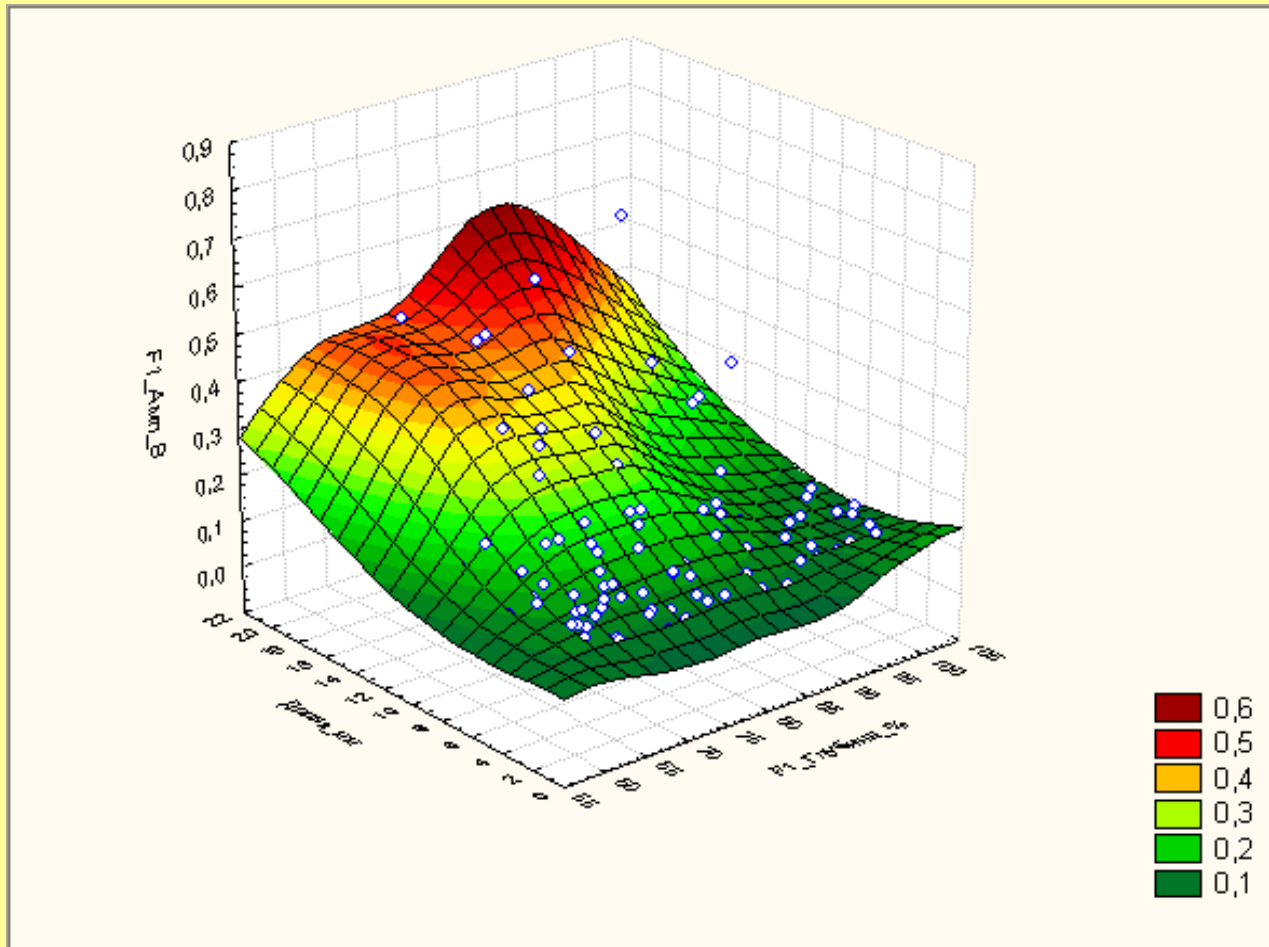
*для частоты 130кГц*



*для частоты 280кГц*



## Двумерные распределения амплитуд сигналов в координатах длина-глубина



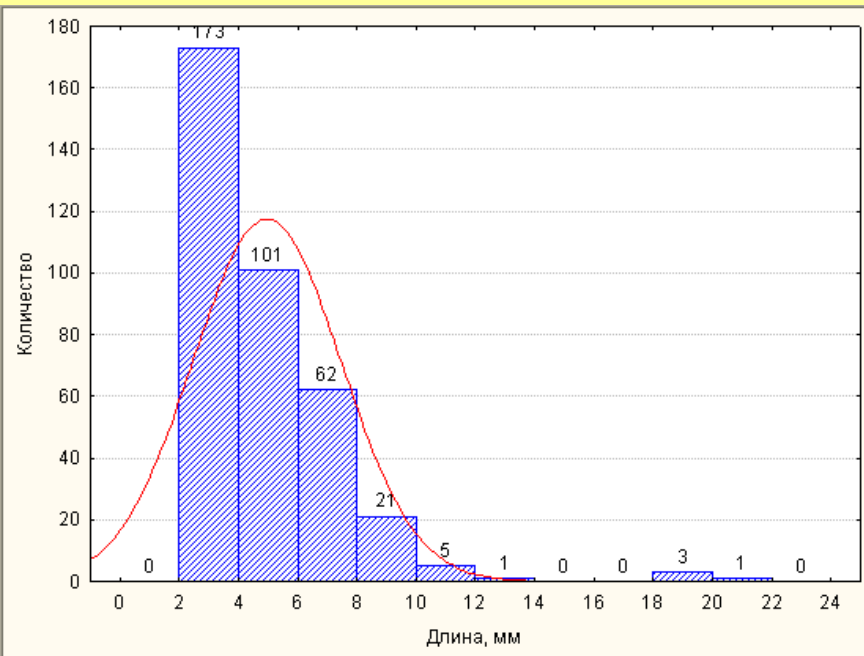


## Состав базы для анализа сигналов

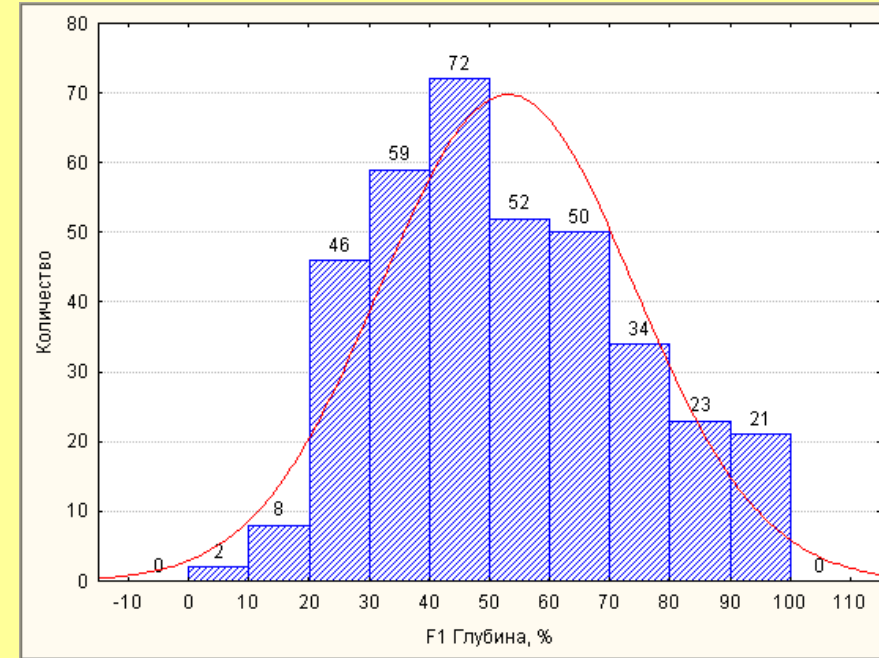
Параметр	Количество	Количество на трубку
Всего трубок	4 643	
Всего лотов	98	
Выявлено индикаций в автоматическом режиме	6 825	~1.47
Выбрано индикаций для анализа (только те, глубина которых была определена)	367	~0.08
Признано "ложными" индикаций	6 458	~1.39



## Анализ статистических распределений по параметрам дефектов



*по длине*

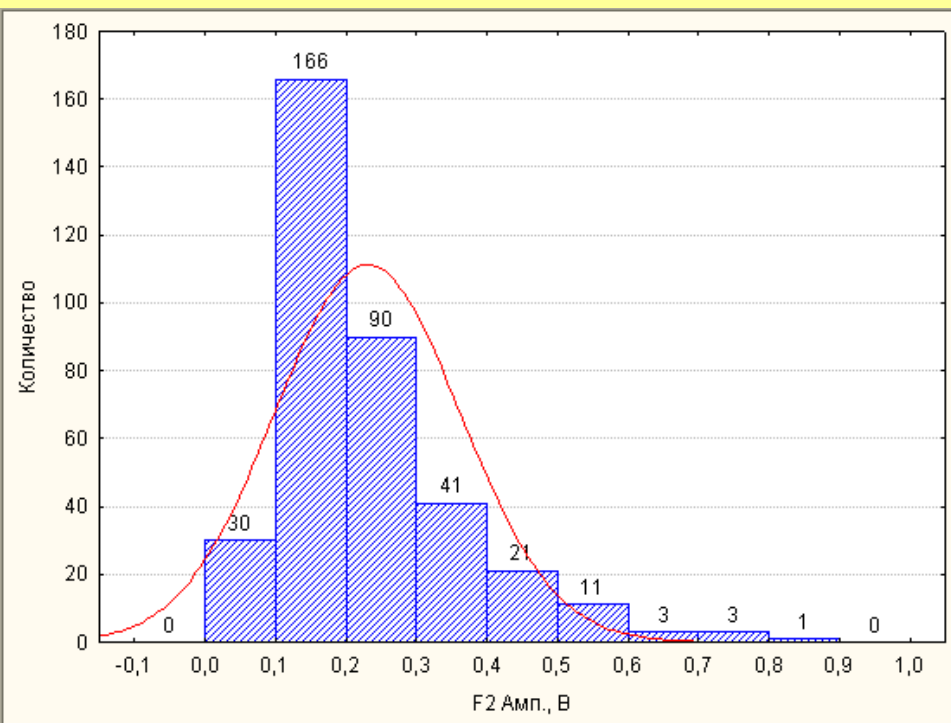


*по глубине*

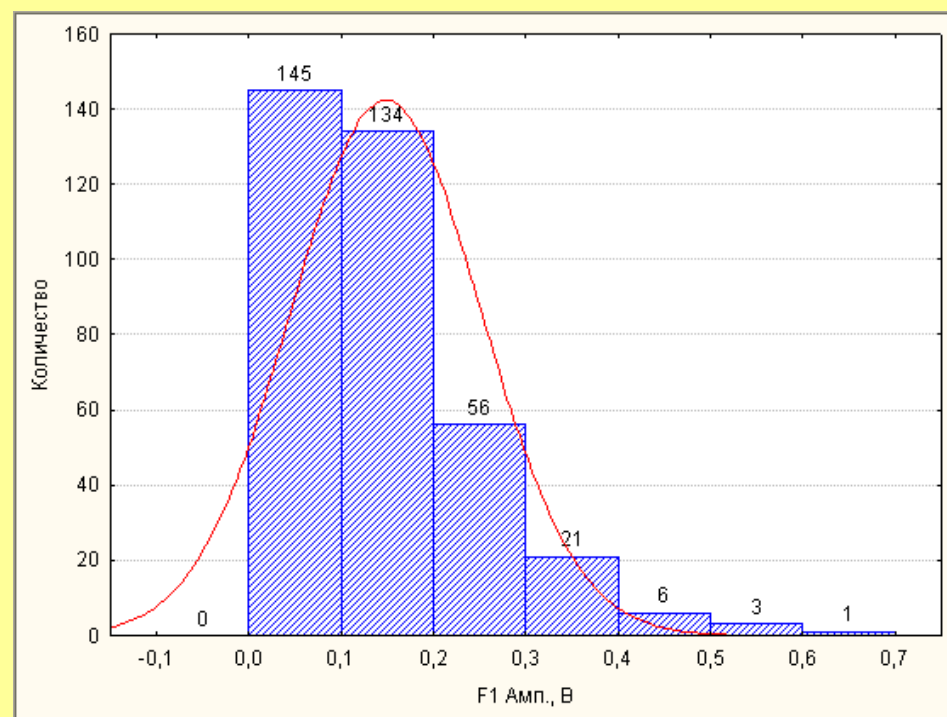




## Анализ статистических распределений параметров сигналов



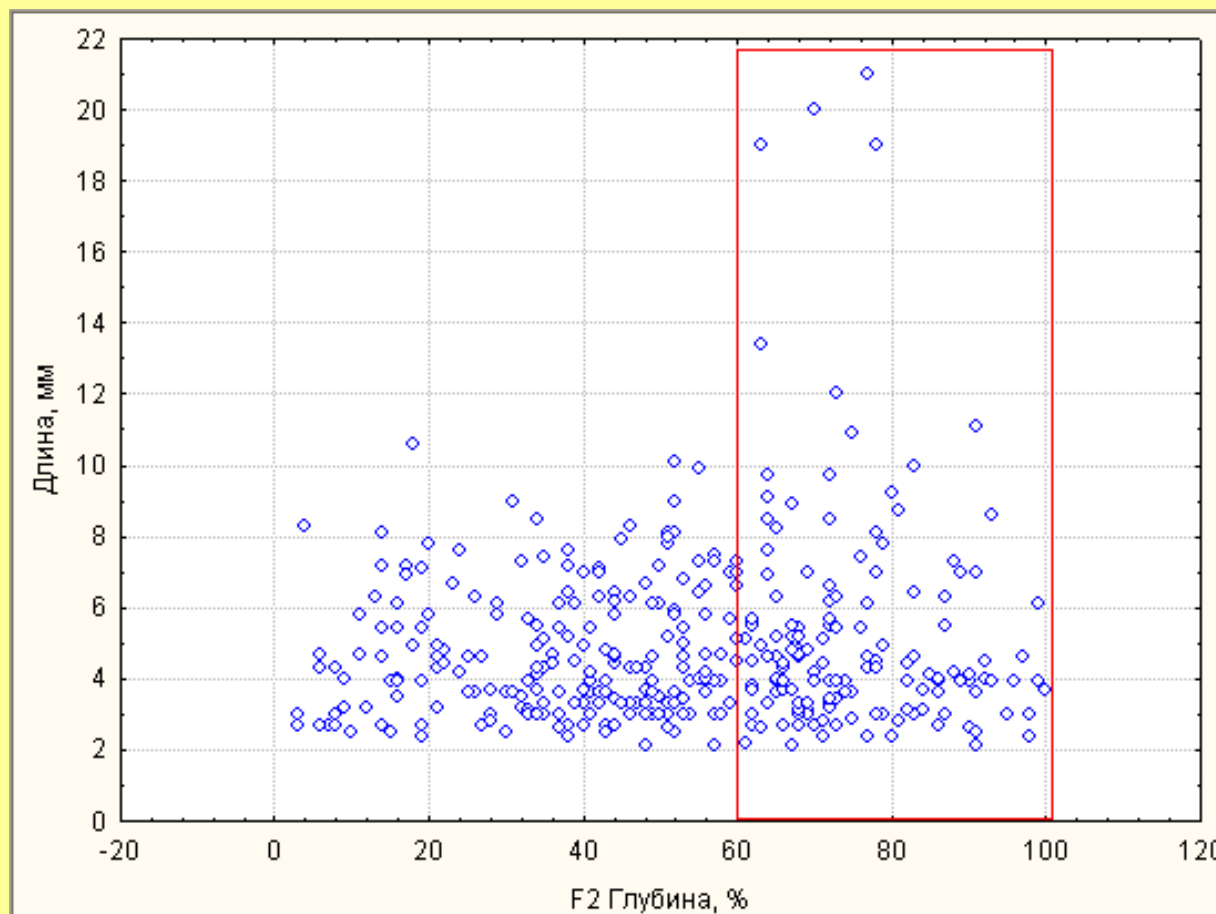
**на частоте 100 кГц**



**на частоте 200 кГц**



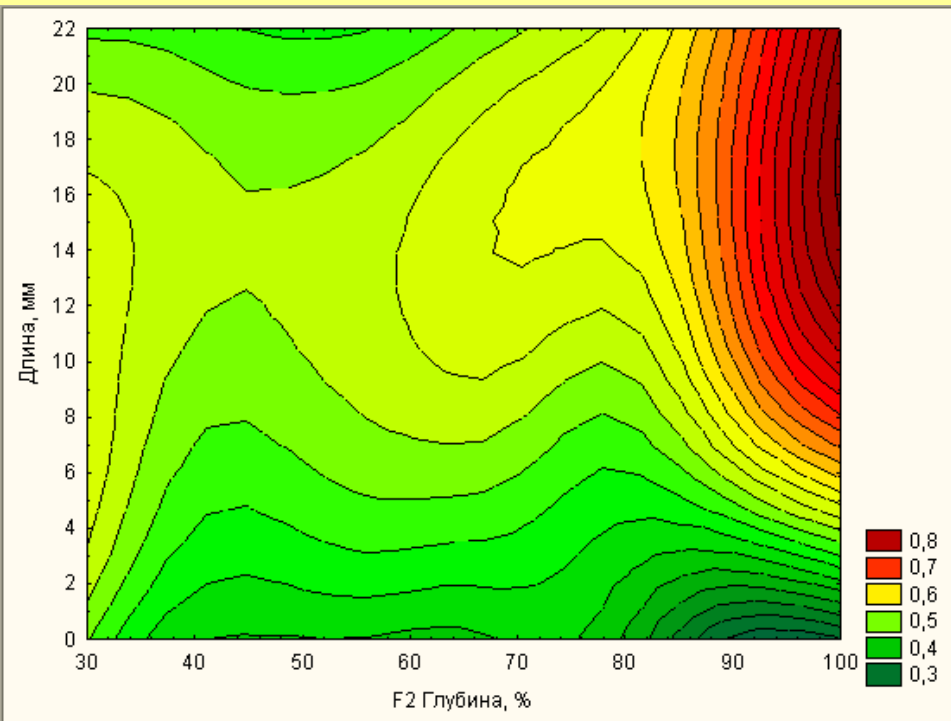
## Распределение дефектов в координатах глубина-длина



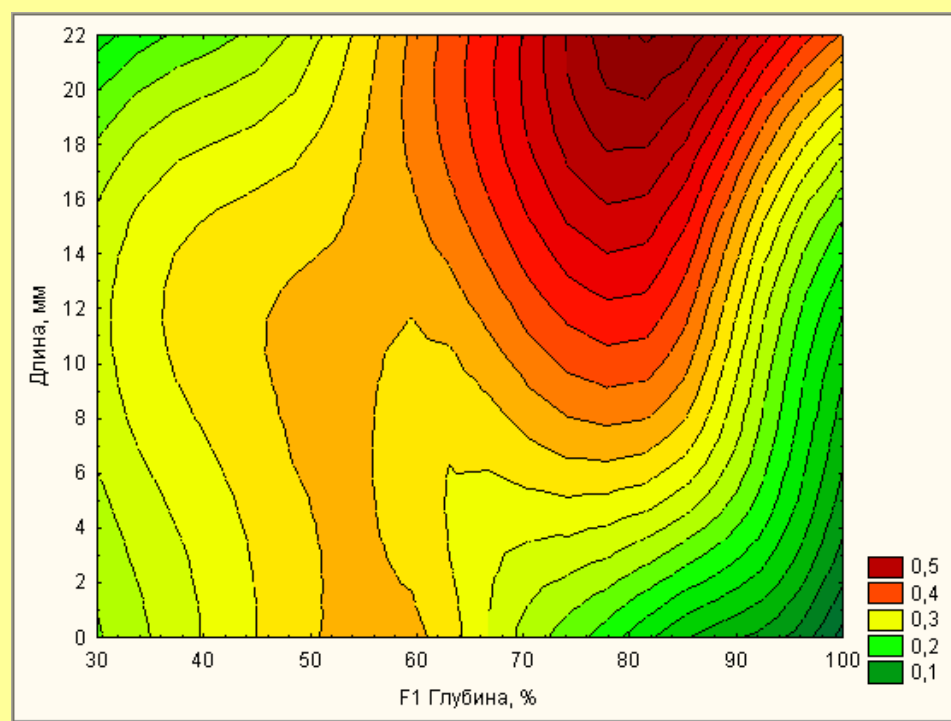
***отмечена зона опасных дефектов, которые имеют большую глубину***



## Двумерные распределения амплитуд сигналов в координатах длина-глубина



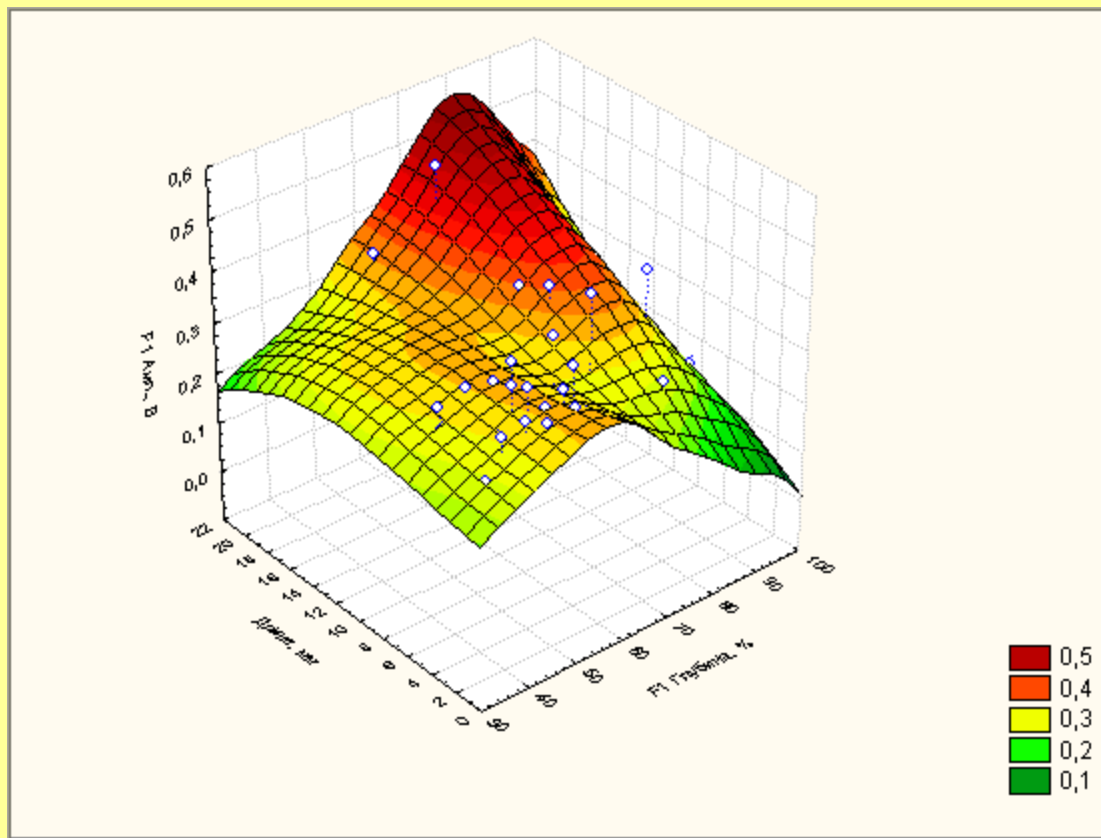
*для частоты 100кГц*



*для частоты 200кГц*



## Двумерные распределения амплитуд сигналов в координатах длина-глубина

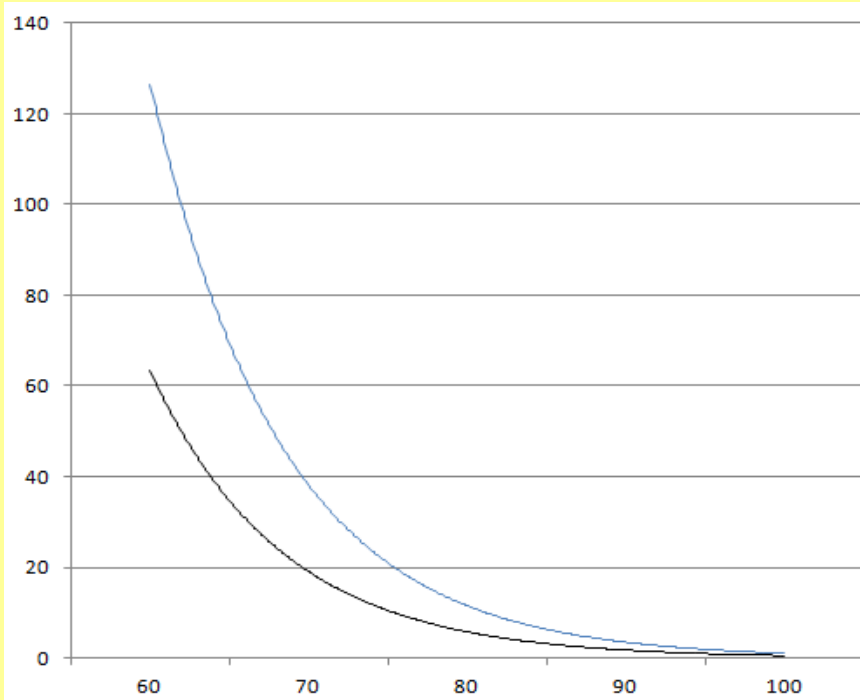




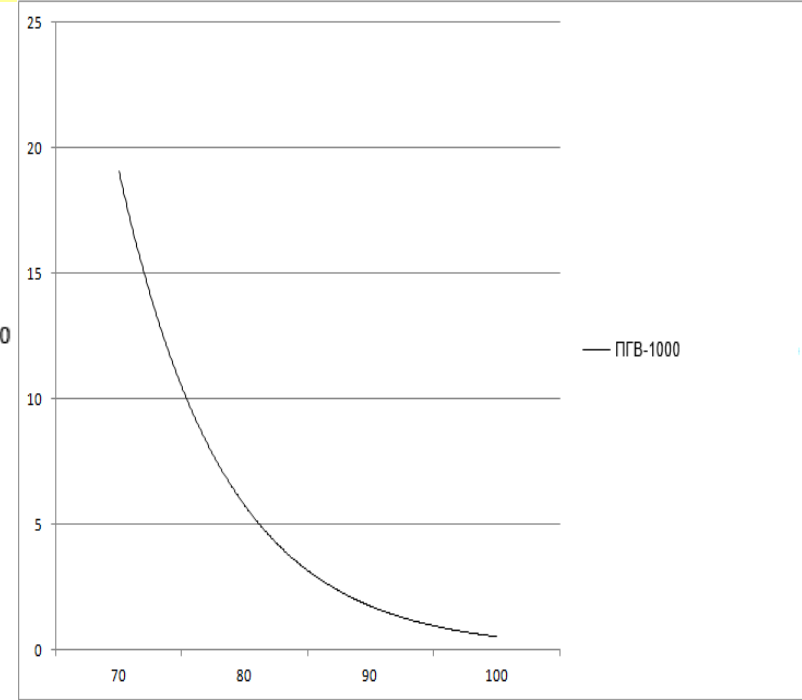
## Обоснование выбора параметров амплитудного критерия

### Кривые допустимых дефектов ТОТ при гидроиспытаниях, полученные в ОАО ОКБ «ГИДРОПРЕСС» Источник:

В.А. Григорьев, В.В. Уланов, А.А. Шубин, Н.Б. Трунов, С.Е. Давиденко, В.В. Денисов  
ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ВИХРЕТОКОВОМУ КОНТРОЛЮ  
ТЕПЛООБМЕННЫХ ТРУБ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ.  
Материалы 7-го межд. сем. по гор. парогенераторам, Россия, Подольск, 2006




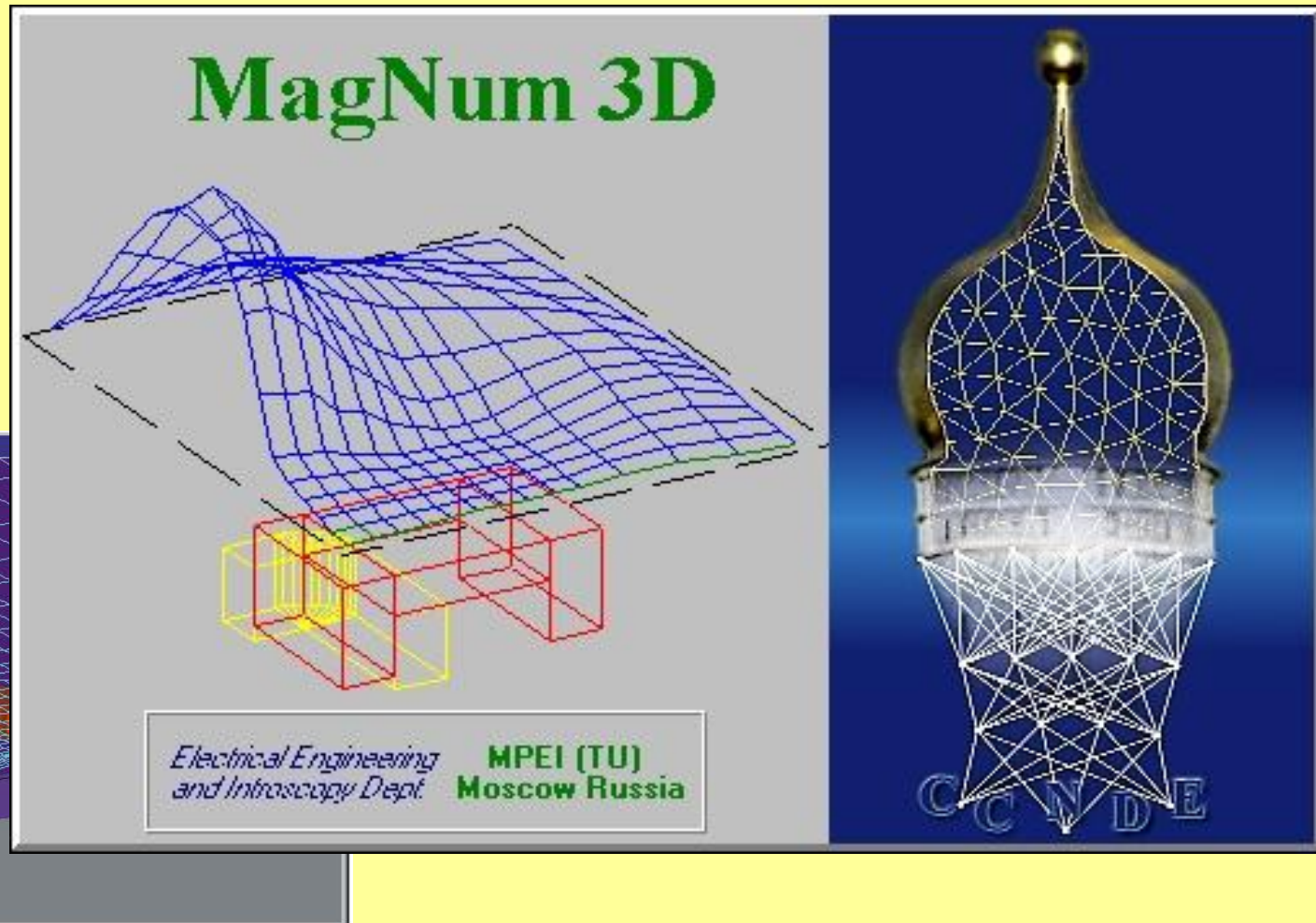
— ПГВ-1000  
— ПГВ-440



— ПГВ-1000



 Численное моделирование вихретоковых сигналов от дефектов ТОТ  
Программа конечно-элементного моделирования MagNum3D



The image displays the MagNum 3D software interface and a 3D model. The main window shows a 3D wireframe mesh of a complex, curved structure, likely a transformer core or winding, with a blue and green color gradient. Below the mesh, there are two rectangular boxes, one yellow and one red, representing defects or specific regions of interest. The text "MagNum 3D" is prominently displayed in green at the top. Below the mesh, the text "Electrical Engineering and Introscopy Dept. MPEI (TU) Moscow Russia" is visible. To the right, a 3D model of a transformer core is shown, rendered in a metallic gold color with a white wireframe overlay, set against a blue background. The letters "CCND E" are visible at the bottom of the model.

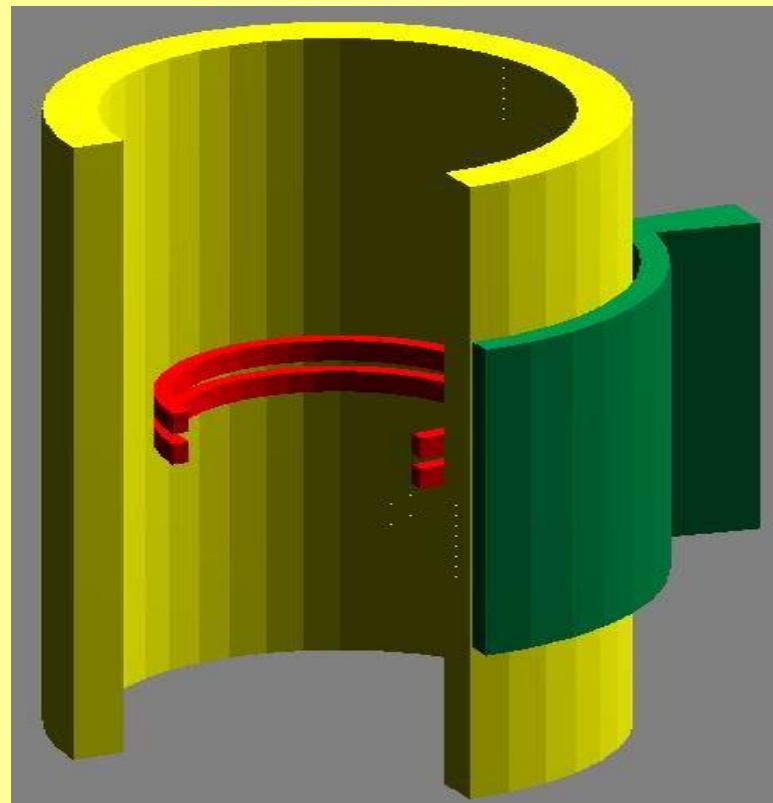
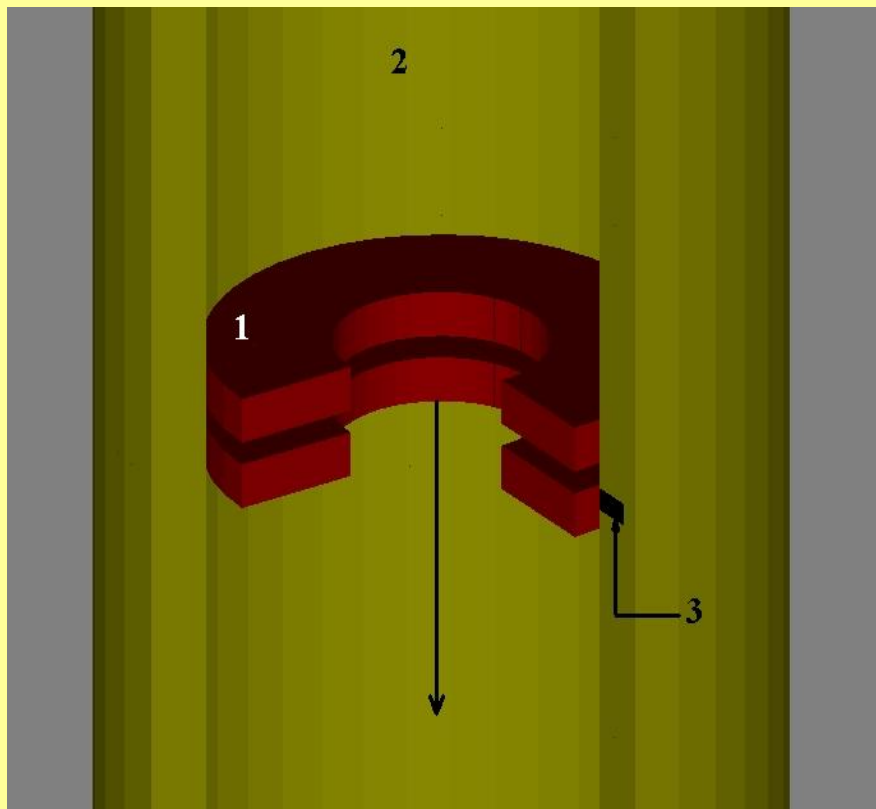
MagNum 3D

PostProcessor

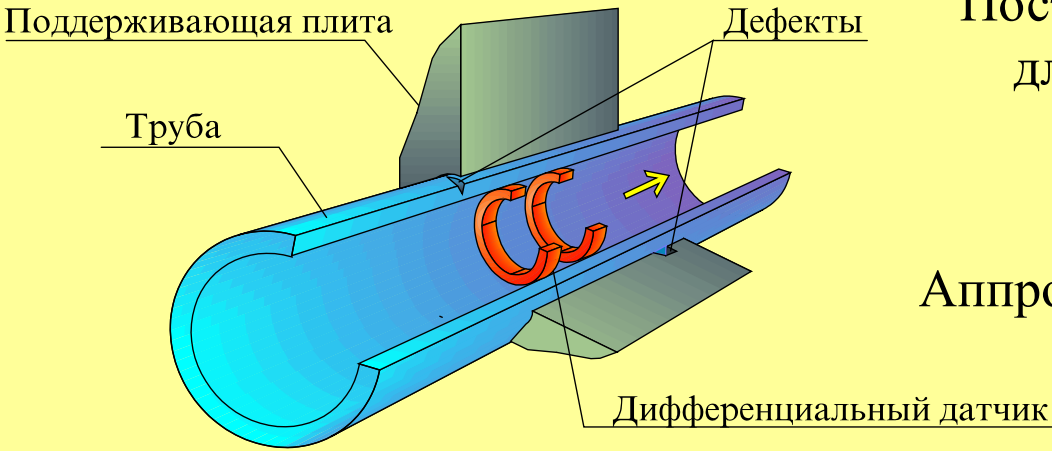
Electrical Engineering and Introscopy Dept. MPEI (TU) Moscow Russia

CCND E

*Модели для расчета сигнала от дефекта  
на открытом участке и под дистанционирующей решеткой*



## Вихретоковый контроль. Двухшаговый алгоритм



Постановка квазистационарной задачи для расчета поля влияния дефекта

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times \dot{\mathbf{A}} \right) + j\omega\sigma\dot{\mathbf{A}} = \mathbf{J}$$

Аппроксимирующая (двумерная) задача расчета распределения поля

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu^0} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}^0 \right) + j\omega\sigma^0\dot{\mathbf{A}}^0 = \mathbf{J}^0$$

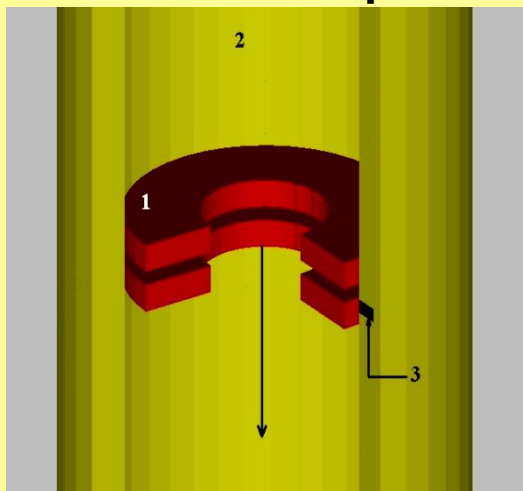
$$-\frac{1}{\mu^0} \Delta \dot{A}_\varphi^0 + \frac{1}{\mu^0 r^2} \dot{A}_\varphi^0 + j\omega\sigma^0 \dot{A}_\varphi^0 = J_\varphi^0$$

При этом поле влияния дефекта определяется решением краевой задачи

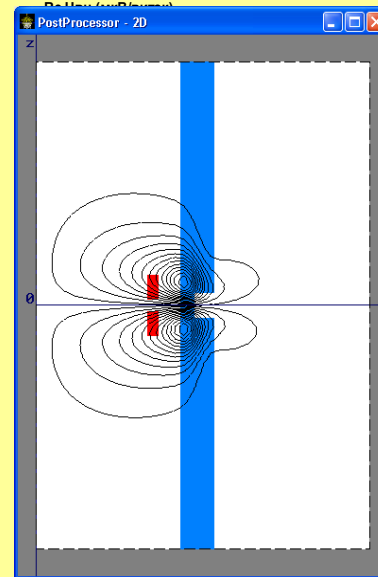
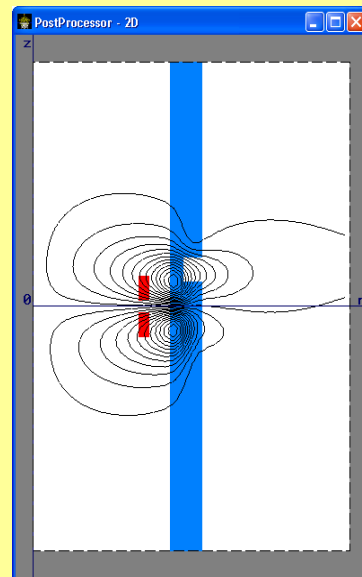
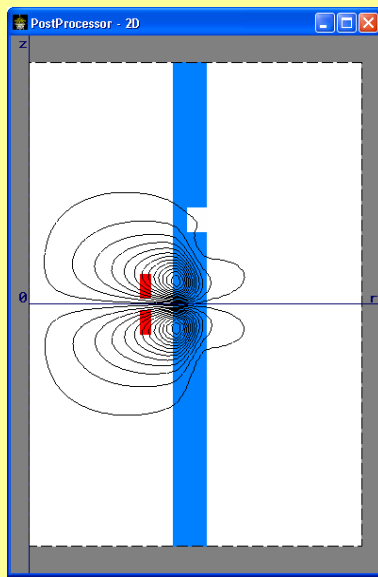
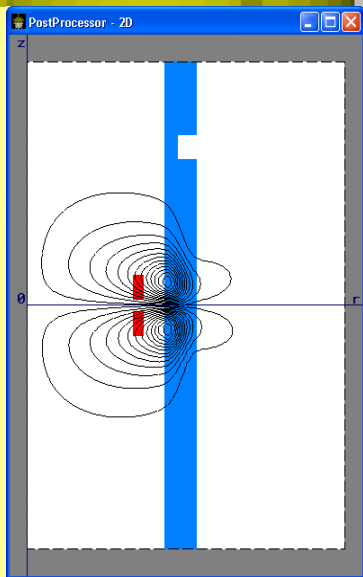
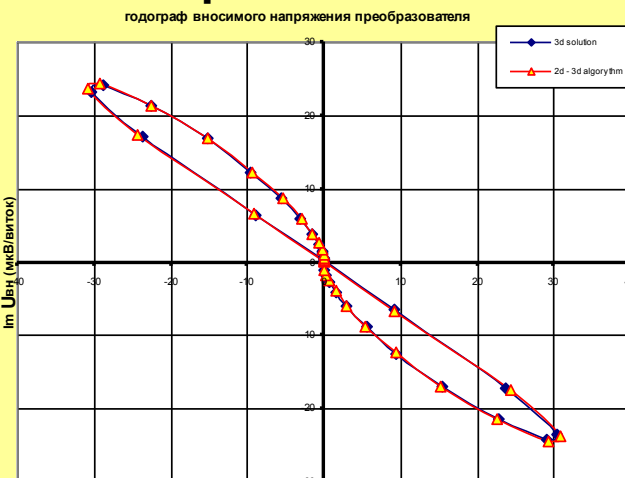
$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}^{def} \right) + j\omega\sigma\dot{\mathbf{A}}^{def} = \mathbf{J}^{non} + \nabla \times \left( \left( \frac{1}{\mu^0} - \frac{1}{\mu} \right) \nabla \times \dot{\mathbf{A}}^0 \right) + j\omega \left( \epsilon^0 - \sigma \right) \dot{\mathbf{A}}^0$$



## Вихретоковый контроль. Двухшаговый алгоритм

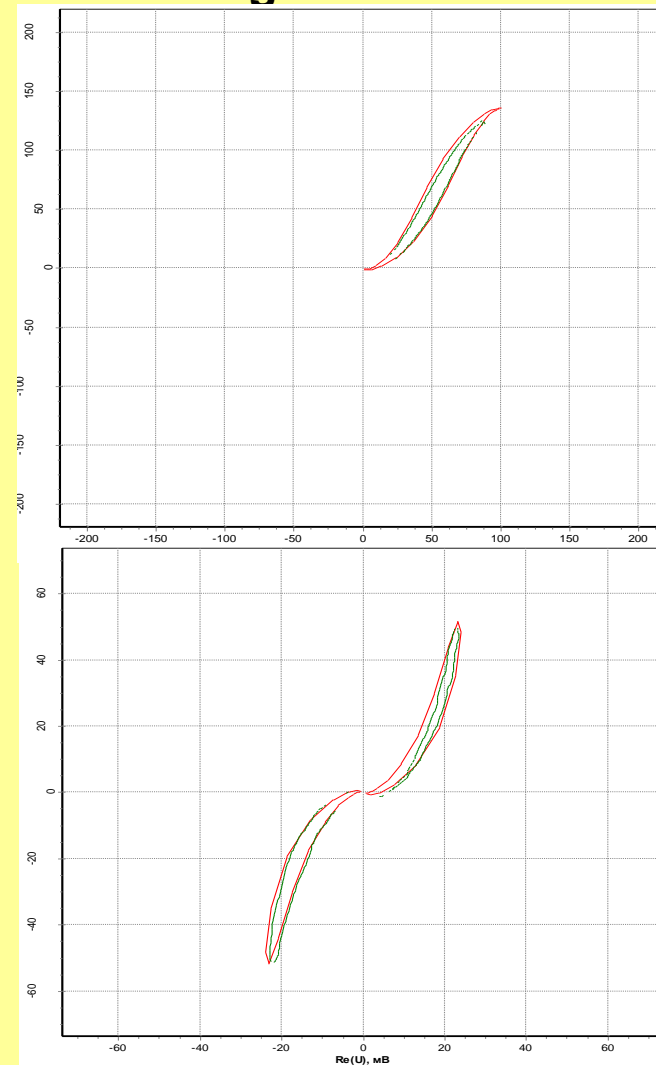
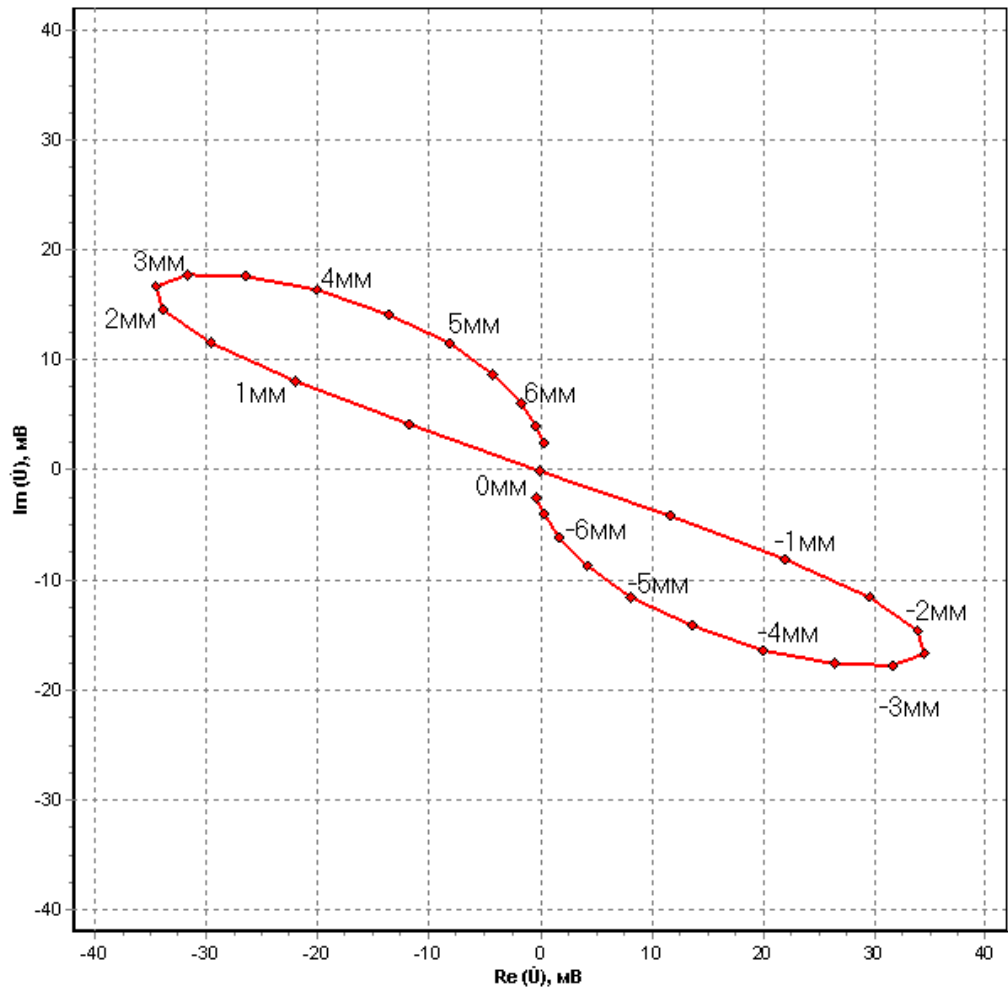


Годограф сигнала.  
Сопоставление расчетов  
по стандартной схеме и  
двухшаговым алгоритмом



## Верификация программного обеспечения MagNum3D

Сигнал на частоте 130кГц





## Обоснование выбора параметров амплитудного критерия

Определение допустимых дефектов и расчет сигналов этих дефектов

Осевая протяженность	Глубина дефекта
5мм, 10мм, 20мм	70%, 80%, 90%

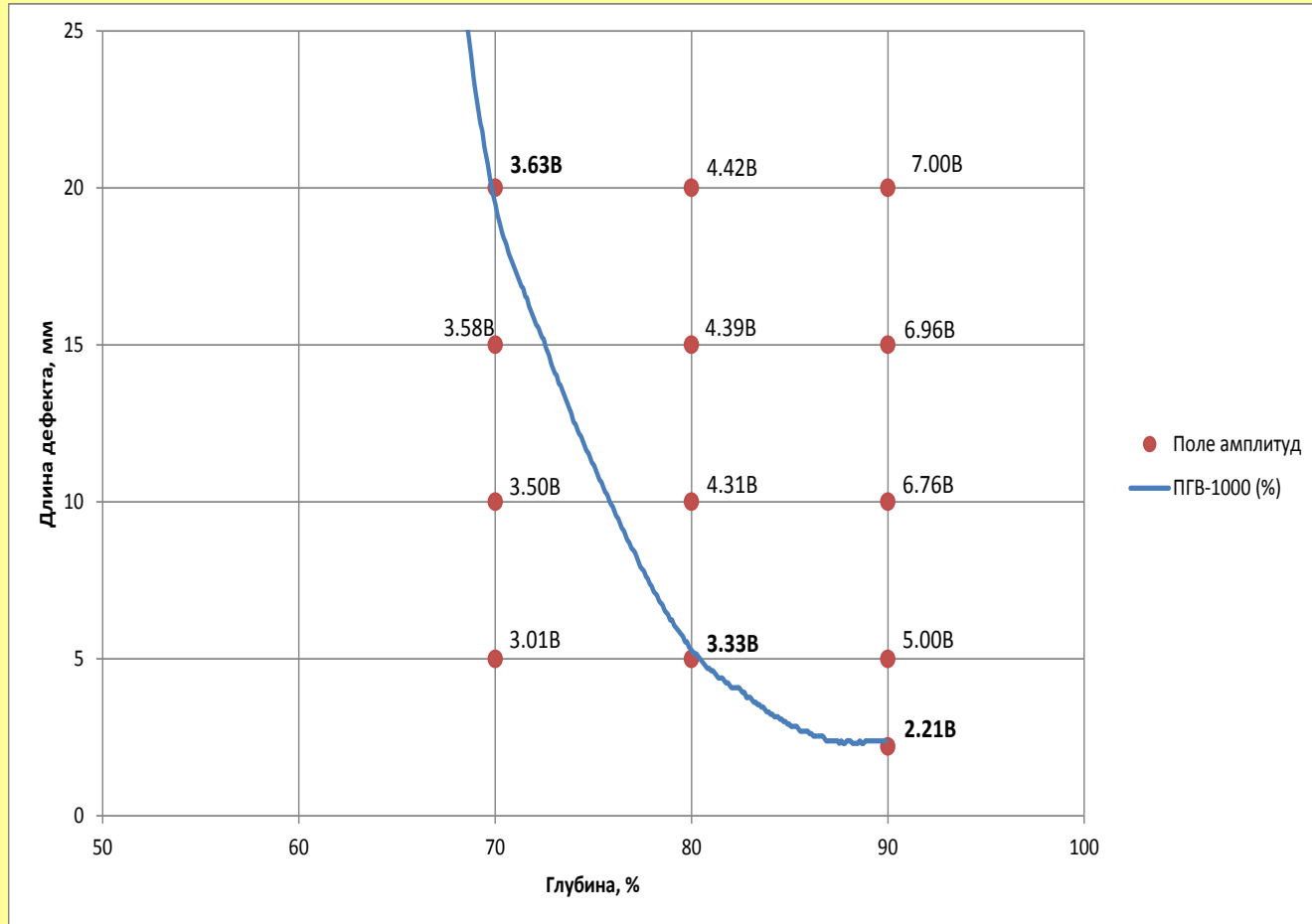
*Амплитуда сигнала для разных значений длины и глубины дефекта*  
штатная система контроля MIZ-70 (основная частота 100кГц, нормировка 10 В)

Длина, мм	Глубина, %		
	70	80	90
20	3.58 В	4.39 В	6.96 В
10	3.50 В	4.31 В	6.76 В
5	3.01 В	3.33 В	5.00 В



# Обоснование выбора параметров амплитудного критерия

## Определение критериальных значений амплитуд для MIZ-70





## Определение параметров амплитудно-фазового критерия для различных штатных систем контроля

**Анализ данных ZETEC MIZ-70 (рабочая частота 100 кГц, нормировка 10 В)**

Допустимая глубина, % от толщины стенки	Допустимая амплитуда сигнала на открытом участке, В	Допустимая амплитуда сигнала от дефекта под решеткой, В
<59%	Трубка не подлежит глушению	
60% - 68%	<3.63	<3.16
69% - 77%	<3.33	<2.90
78% - 87%	<2.21	<1.92
88% - 100%	Трубка подлежит глушению независимо от амплитуды	



## Определение параметров амплитудно-фазового критерия для различных штатных систем контроля

**Система HAMONIC-210 - AIDA (рабочая частота 130 кГц, нормировка 1,4 В)**

Допустимая глубина, % от толщины стенки	Допустимая амплитуда сигнала на открытом участке, В	Допустимая амплитуда сигнала от дефекта под решеткой, В
<59%	Трубка не подлежит глушению	
60% - 68%	<0.63	<0.55
69% - 77%	<0.58	<0.50
78% - 87%	<0.38	<0.33
88% - 100%	Трубка подлежит глушению независимо от амплитуды	



## Определение параметров амплитудно-фазового критерия для различных штатных систем контроля

Обработка данных PIRATE (рабочая частота 130 кГц, нормировка 1 В)

Допустимая глубина, % от толщины стенки	Допустимая амплитуда сигнала на открытом участке, В	Допустимая амплитуда сигнала от дефекта под решеткой, В
<59%	Трубка не подлежит глушению	
60% - 68%	<0.37	<0.32
69% - 77%	<0.34	<0.29
78% - 87%	<0.23	<0.20
88% - 100%	Трубка подлежит глушению независимо от амплитуды	



## Определение параметров амплитудно-фазового критерия для различных штатных систем контроля

Анализ данных Techatom TEDDY (рабочая частота 100 кГц, нормировка 5 В)

Допустимая глубина, % от толщины стенки	Допустимая амплитуда сигнала на открытом участке, В	Допустимая амплитуда сигнала от дефекта под решеткой, В
<59%	Трубка не подлежит глушению	
60% - 68%	<1.64	<1.43
69% - 77%	<1.50	<1.31
78% - 87%	<1.00	<0.87
88% - 100%	Трубка подлежит глушению независимо от амплитуды	





## Тестовые испытания амплитудного критерия

### Анализ данных PIRATE

(рабочая частота 130 кГц, нормировка 1 В)

Всего 8890 индикаций

Цветом (красным и зелёным)

отмечены дефекты, которые должны быть  
заглушены по РД ЭО 1.1.2.16.0157-2009 –  
260 дефектов

По амплитудно-фазовому критерию –  
260 – 89 = 171,

89 (34%) дефектов будет «амнистировано»

Расположение		Общие	F2	
Ряд	Кол	Класс	F2 Ампл., В	F2 Глубина, %
69	19	DF	0,73009752	89
69	19	DF	0,23322916	77
71	25	DF	0,25218603	63
71	25	DF	0,37325597	51
71	25	DF	0,11060243	2
73	21	DF	0,18074755	60
73	21	DP	0,13174553	73
76	24	DF	0,12555891	34
21	29	DP	0,10915876	19
4	38	DP	0,16366076	30
7	33	DP	0,18111248	98
6	18	DP	0,12199145	81
67	-33	DF	0,11012904	61
68	-34	DF	0,21544348	69
74	-38	DF	0,1637788	10
68	-30	DF	0,12429922	31
69	-31	DF	0,09645715	46
69	-31	DF	0,34739686	91
69	-31	DF	0,41483283	62
71	-25	DF	0,20038317	19
72	-32	DF	0,59218399	89
72	-32	DF	0,12599466	28
73	-25	DF	0,12039964	77





## ВЫВОДЫ

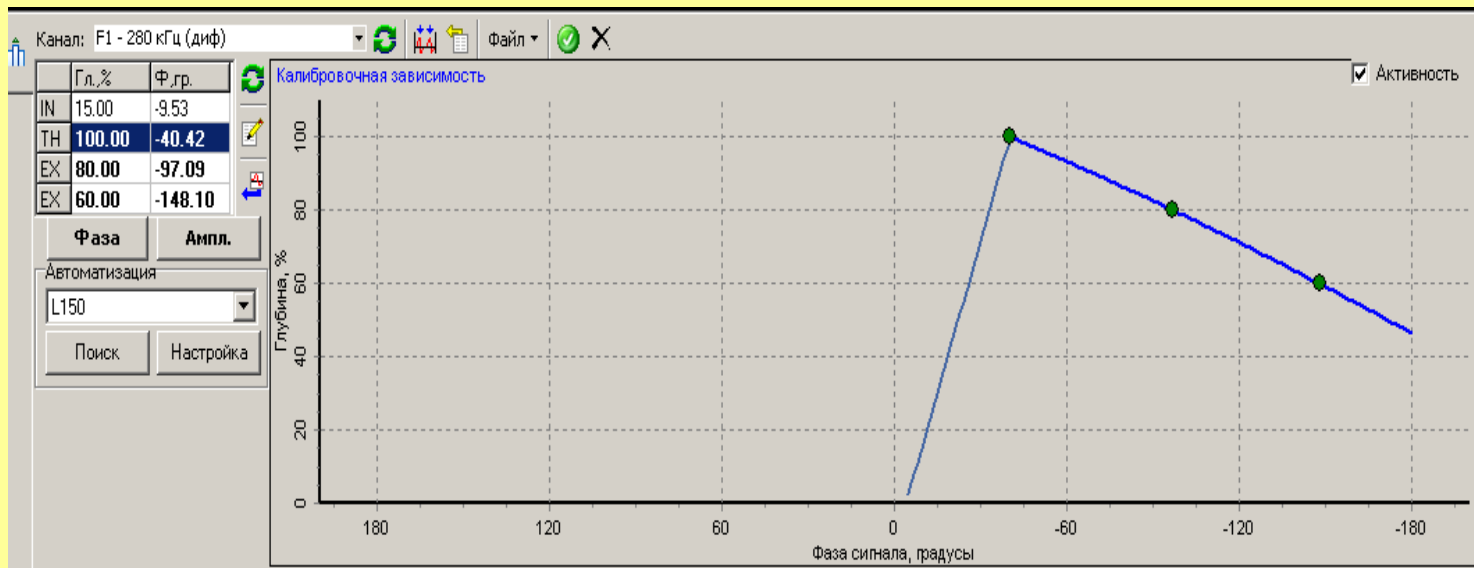
1. Проведен анализ возможности применения амплитудного критерия при глушении ТОТ ПГ АЭС - исследованы сигналы ВТК по результатам ППР на Кольской (ВВЭР-440) и Балаковской АЭС (ВВЭР-1000).
- 2. Анализ исследования: при решении вопроса о глушении должны учитываться амплитуды сигналов в совокупности с оценкой основных геометрических параметров дефекта – его глубины и осевой протяженности.**
3. 3D моделированием (MagNum3D) рассчитаны сигналы преобразователей от дефектов типа продольной трещины допускаемой глубины и разных диапазонов длины.
- 4. Геометрические параметры предельно допустимых дефектов определены по результатам исследований, проведенных в ОАО ОКБ «ГИДРОПРЕСС».**
5. Проведены тестовые испытания алгоритма выявления индикаций сигнала, соответствующих предлагаемому амплитудно-фазовому критерию, на реальных сигналах эксплуатационного ВТК в ППР-2013 Кольской и Калининской АЭС.



# Ростовская АЭС, ноябрь 2013, трубка 37-99-II-Г. Анализ ВТ сигналов

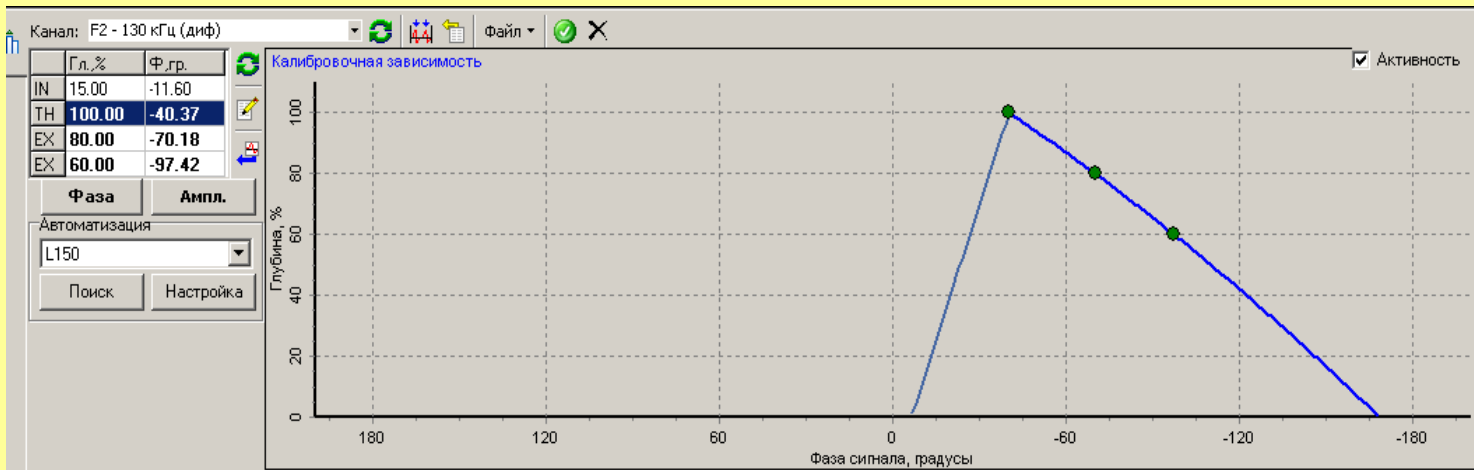
## Эталонирование по сквозному дефекту калибровочной трубки до 1В, -40°

F1 = 280кГц



ВТК система  
Harmonic-AIDA

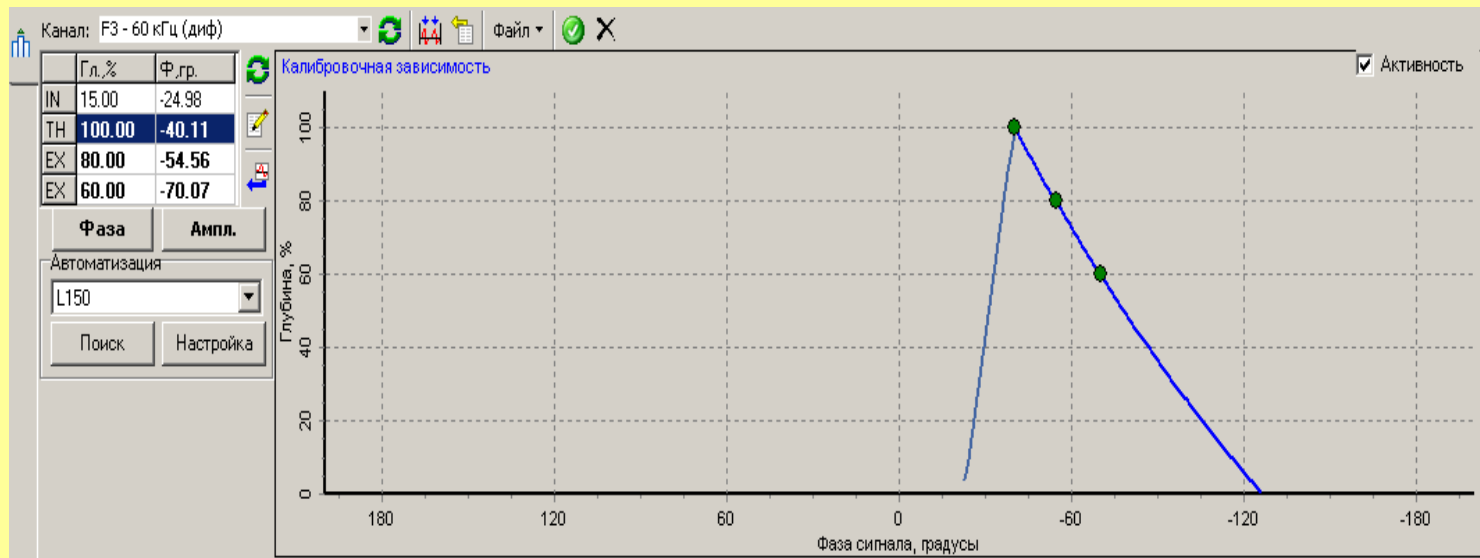
F2 = 130кГц



# Ростовская АЭС, ноябрь 2013, трубка 37-99-II-Г. Анализ ВТ сигналов

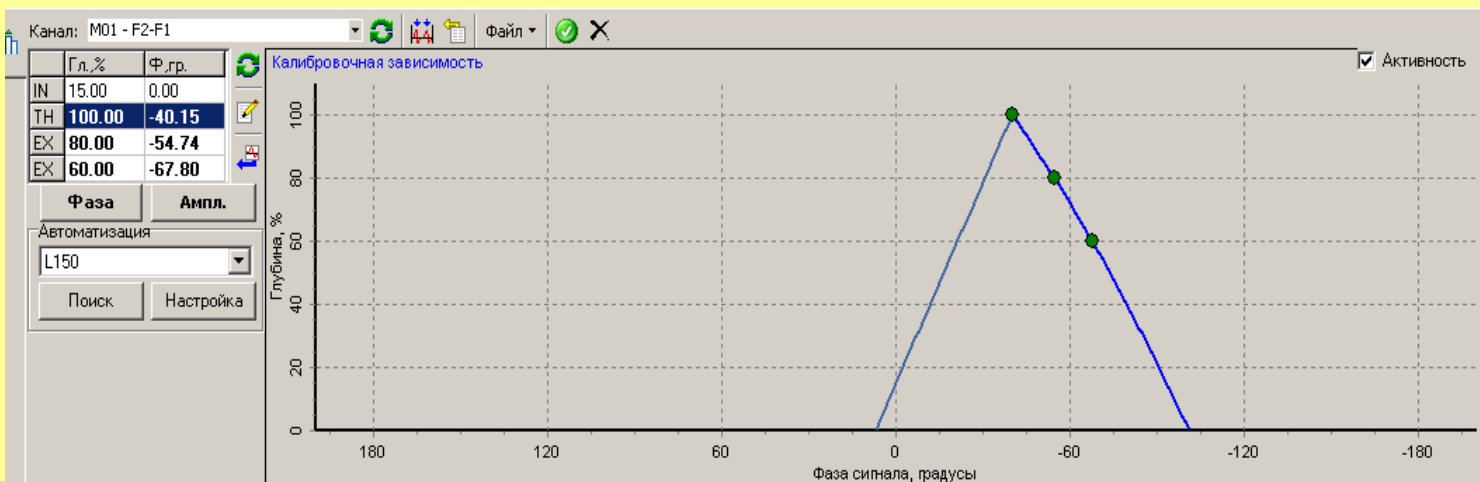
## Эталонирование по сквозному дефекту калибровочной трубки до 1В, -40°

F3 = 60кГц



ВТК система  
Harmonic-AIDA

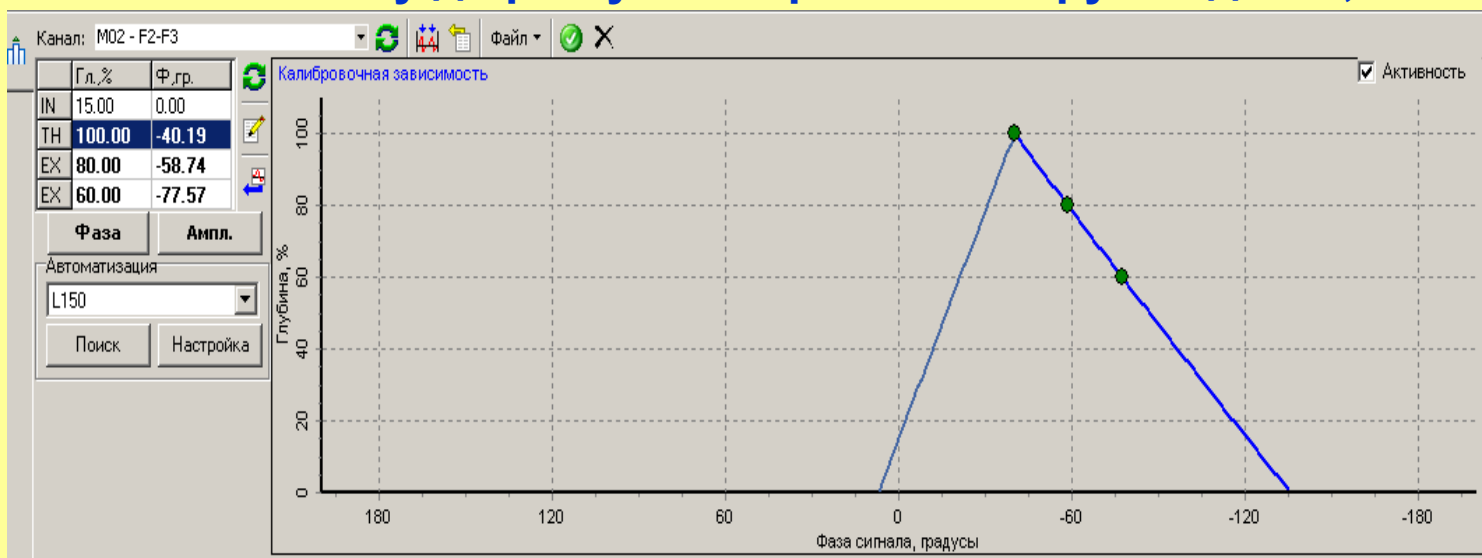
M1 = F2 - F1



# Ростовская АЭС, ноябрь 2013, трубка 37-99-II-Г. Анализ ВТ сигналов

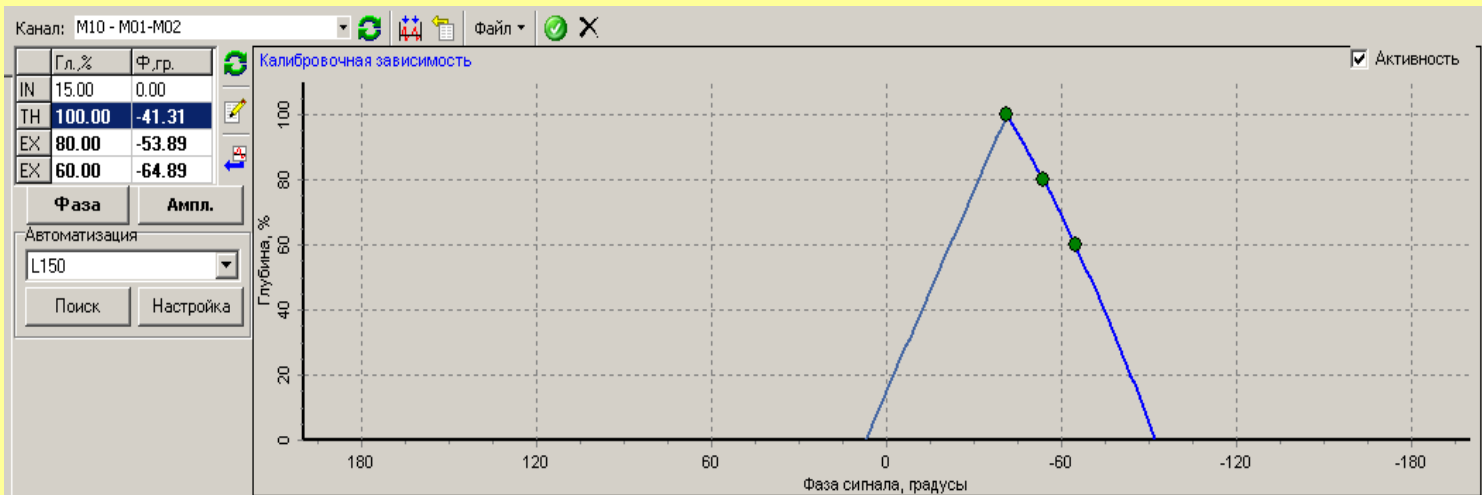
## Эталонирование по сквозному дефекту калибровочной трубки до 1В, -40°

$M2 = F2 - F3$



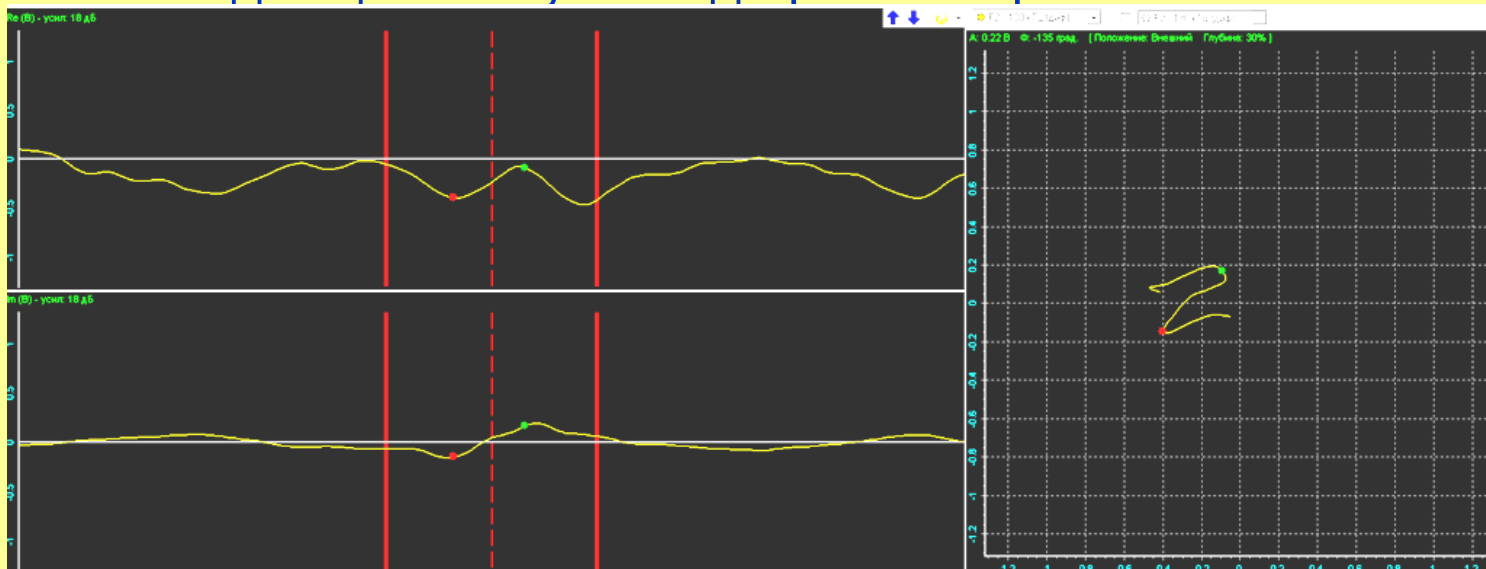
ВТК система  
Harmonic-AIDA

$M12 = M1 - M2$

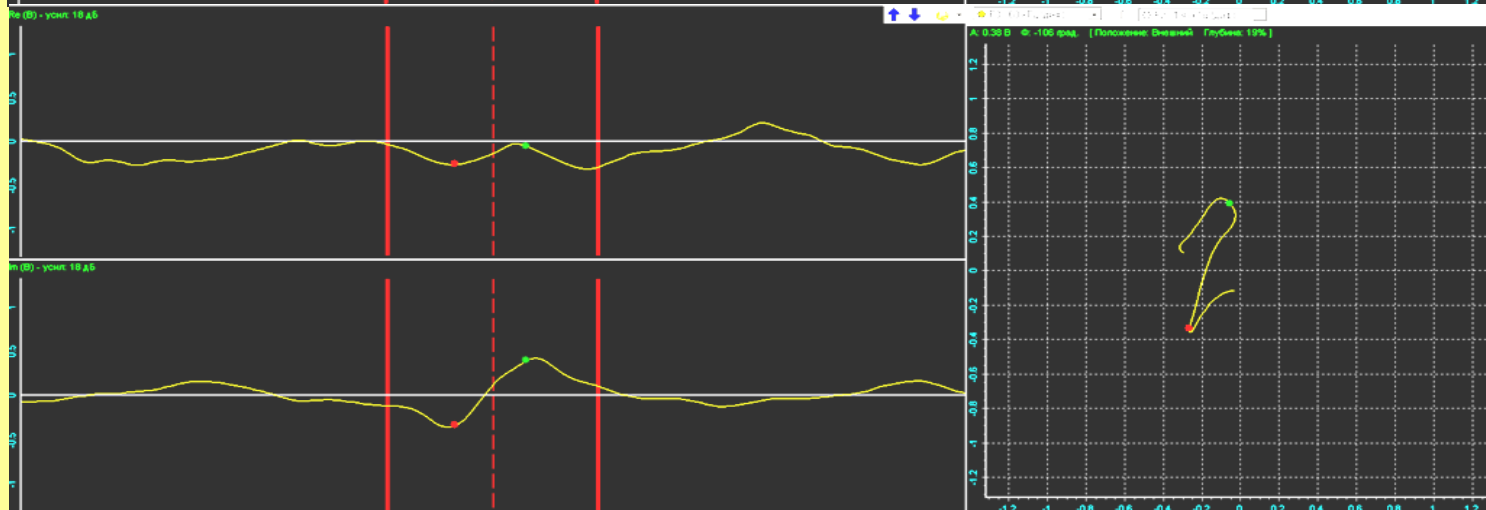


2012 год. Оценка глубины дефекта на разных частотах

F2 = 130кГц,  
Глубина 30%



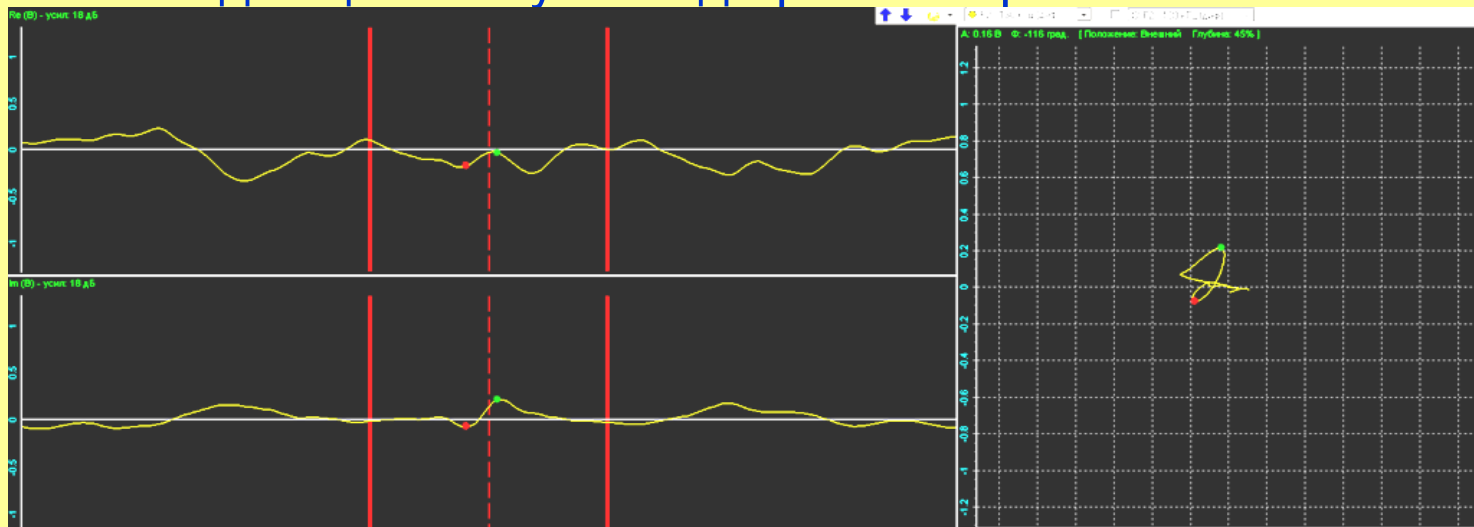
F3 = 60кГц,  
Глубина 19%



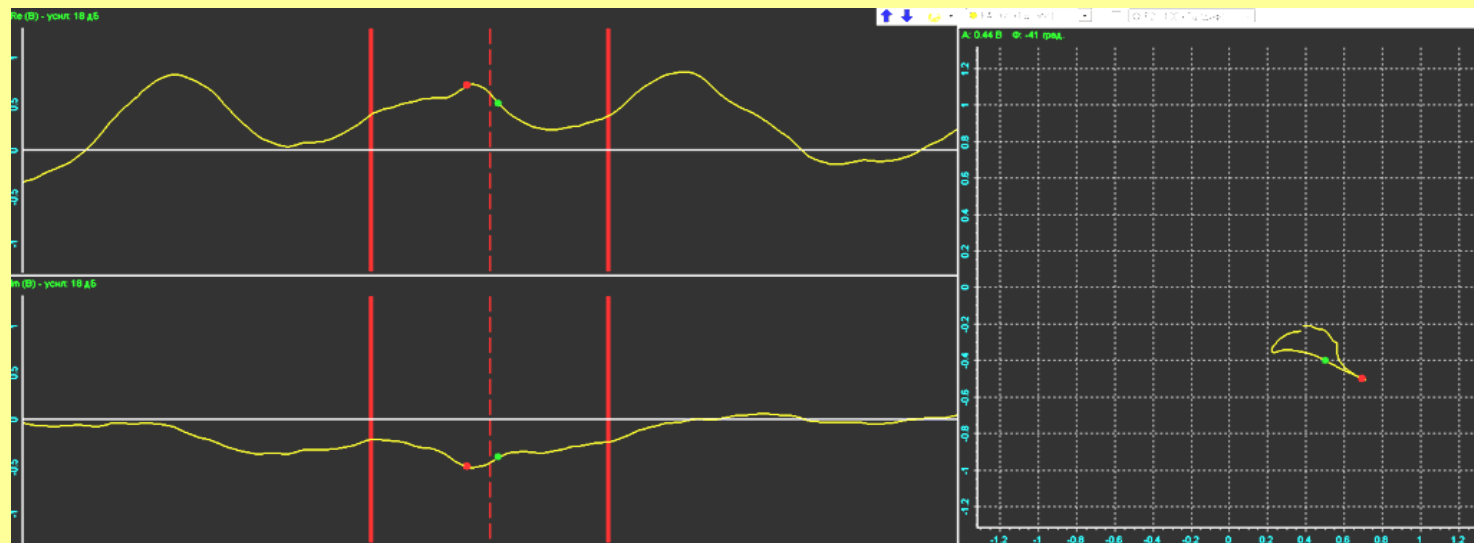
# Ростовская АЭС, ноябрь 2013, трубка 37-99-II-Г. Анализ ВТ сигналов

## 2010 год. Оценка глубины дефекта на разных частотах

**F2 = 130кГц,  
Глубина 45%**



**F3 = 60кГц,  
Глубина 42%**



## РЕЗУЛЬТАТ АНАЛИЗА:

На трубке 37-99-II-Г обнаружен дефект

Расположение Р6 - 123мм

Оценки по основной частоте  $F2 = 130\text{кГц}$ :

2010 год – Ампл.=0.16В, Фаза=-116<sup>0</sup>, Внешний 45%

2012 год – Ампл.=0.22В, Фаза=-135<sup>0</sup>, Внешний 30%

Эталонирование по сквозному дефекту  
калибровочной трубки до 1В, -40<sup>0</sup>