

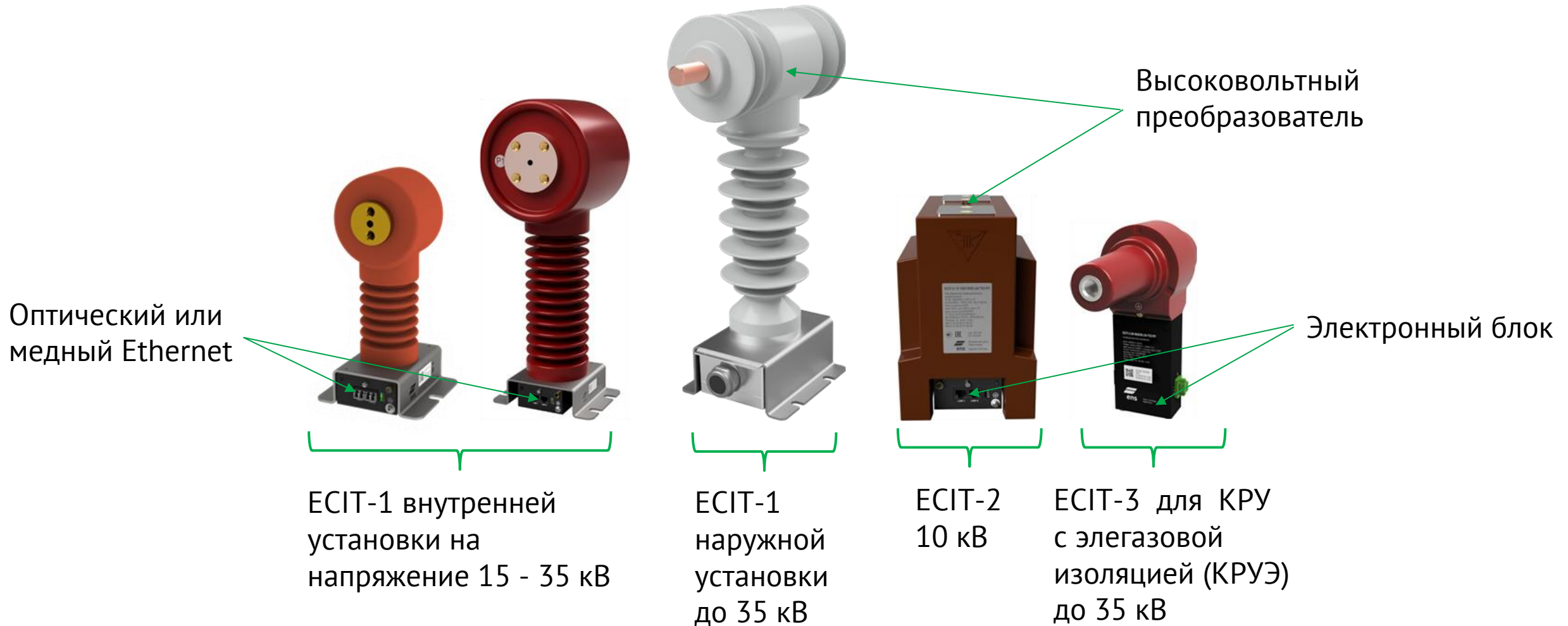


**II Всероссийская научно-техническая конференция
«Новые технологии в релейной защите и автоматизации
энергетических систем»**

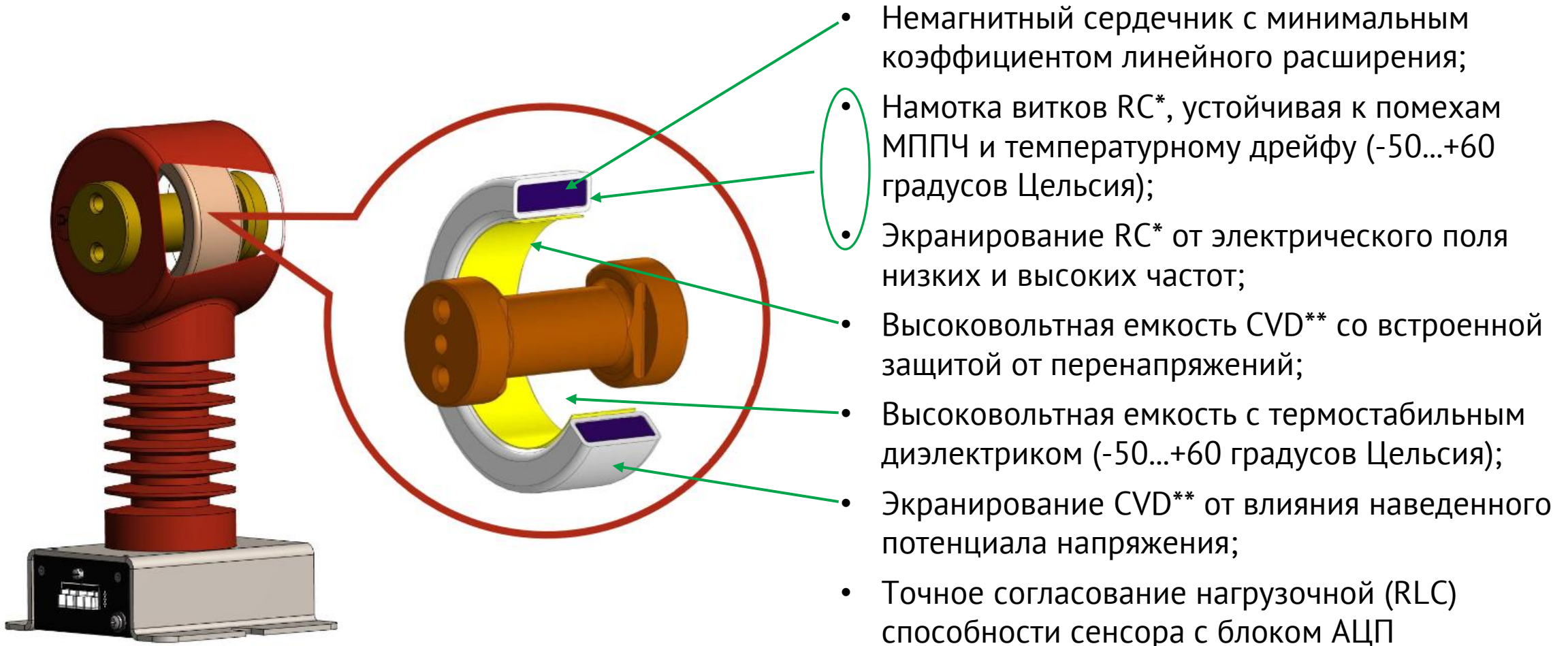
**Цифровой измерительный комбинированный трансформатор с
синхронизированными векторными измерениями**

Докладчик: **Андреев Павел Игоревич**
Организация: **Северный (Арктический) Федеральный
Университет (САФУ), ИЦ «Энергосервис»**
Научный руководитель: **Мокеев А.В., д.т.н.**

Чебоксары,
14-16 апреля 2026 г.

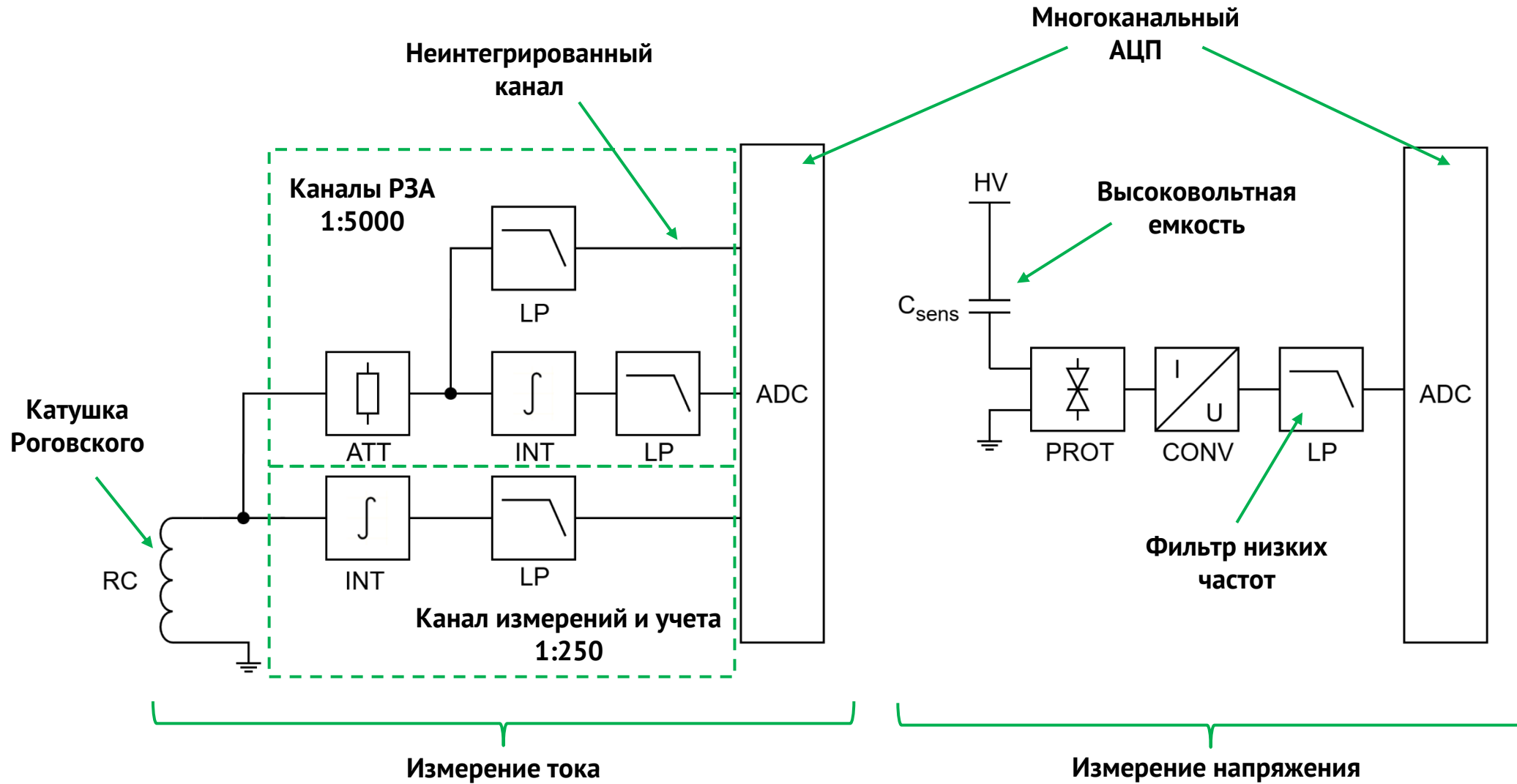


*Цифровой комбинированный измерительный трансформатор ECIT-1 внесен в реестр средств измерений (Госреестр СИ 94207-24)



* RC (Rogowski coil) – катушка Роговского

** CVD (capacitive voltage divider) – емкостной делитель напряжения



Решение	Эффект
Комбинированный первичный преобразователь	ТН и ТТ в одном корпусе
Широкий диапазон измерения	Одно исполнение (ЕСІТ-1-15-50) на напряжение от 3 до 15 кВ, и на номинальный ток нагрузки 50 – 1000 А
Цифровой выход	Отсутствие влияния вторичной нагрузки
Катушка Роговского для измерения тока	Отсутствие эффектов насыщения и остаточной намагниченности
Самодиагностика	Контроль работоспособности, исправности электронных компонентов и нагрева
Применение маломощных первичных преобразователей	Компактность
Геометрически правильная* намотка катушки	Снижение влияния токов соседних фаз
Экранирование катушки Роговского и высоковольтной емкости	Снижение влияния фазного напряжения
Применение материалов с минимальным коэффициентом теплового расширения-сжатия	Низкий температурный дрейф
Согласование комбинированного первичного преобразователя с электронным блоком	Правильное измерение тока и напряжения в широком диапазоне

Table 7 – WB0 extension level for harmonics

Accuracy class	Ratio error at low frequency		Ratio error at harmonics based on f_r				Phase error at low frequency	Phase error at harmonics based on f_r			
	%		%				Degrees	Degrees			
	DC ^a	1 Hz	2 nd to 4 th	5 th and 6 th	7 th to 9 th	10 th to 13 th	1 Hz	2 nd to 4 th	5 th and 6 th	7 th to 9 th	10 th to 13 th
0,1	+1 -100	+1 -30	±1	±2	±4	±8	±45	±1	±2	±4	±8
0,2 – 0,2 S ^b	+2 -100	+2 -30	±2	±4	±8	±16	±45	±2	±4	±8	±16
0,5 – 0,5 S ^b	+5 -100	+5 -30	±5	±10	±20	±20	±45	±5	±10	±20	±20
1 – 3 – 5	+10 -100	+10 -30	±10	±20	±20	±20	±45	±10	±20	±20	±20

^a DC coupling is allowed but not required.

^b The accuracy classes 0,2 S and 0,5 S apply only for current transformers.

Table 8 – Accuracy class extensions for wide bandwidth applications

Accuracy class	Ratio error at frequencies shown below			Phase error at frequencies shown below		
	%			Degrees		
WB1	$f_r < f \leq 1$ kHz	$1 < f \leq 1,5$ kHz	$1,5 < f \leq 3$ kHz	$f_r < f \leq 1$ kHz	$1 < f \leq 1,5$ kHz	$1,5 < f \leq 3$ kHz
WB2	$f_r < f \leq 5$ kHz	$5 < f \leq 10$ kHz	$10 < f \leq 20$ kHz	$f_r < f \leq 5$ kHz	$5 < f \leq 10$ kHz	$10 < f \leq 20$ kHz
WB3	$f_r < f \leq 20$ kHz	$20 < f \leq 50$ kHz	$50 < f \leq 150$ kHz	$f_r < f \leq 20$ kHz	$20 < f \leq 50$ kHz	$50 < f \leq 150$ kHz
WB4	$f_r < f \leq 50$ kHz	$50 < f \leq 150$ kHz	$150 < f \leq 500$ kHz	$f_r < f \leq 50$ kHz	$50 < f \leq 150$ kHz	$150 < f \leq 500$ kHz
0,1	±1	±2	±5	±1	±2	±5
0,2 – 0,2 S	±2	±4	±5	±2	±4	±5
0,5 – 0,5 S	±5	±10	±10	±5	±10	±20
1	±10	±20	±20	±10	±20	±20
Protection	±10	±20	±30	-	-	-

The accuracy classes 0,2 S and 0,5 S apply only for current transformers.

Table 9 – Harmonic requirements for protection accuracy classes

Ratio error at low frequency		Ratio error at frequencies and harmonics shown below, based on f_r		Phase error at low frequency	Phase error at frequencies and harmonics shown below, based on f_r	
		%			Degrees	
DC	1 Hz	1/3 rd component (16,7 Hz or 20 Hz)	2 nd to 5 th harmonic	1 Hz	1/3 rd component (16,7 Hz or 20 Hz)	2 nd to 5 th harmonic
+10 -100	+10 -30	±10	±10	-	±10	±10

Требования к измерительным трансформаторам описаны в серии международных стандартов IEC 61869 (ГОСТ Р МЭК 61869). Общие требования описаны в первой части IEC 61869-1:2023.

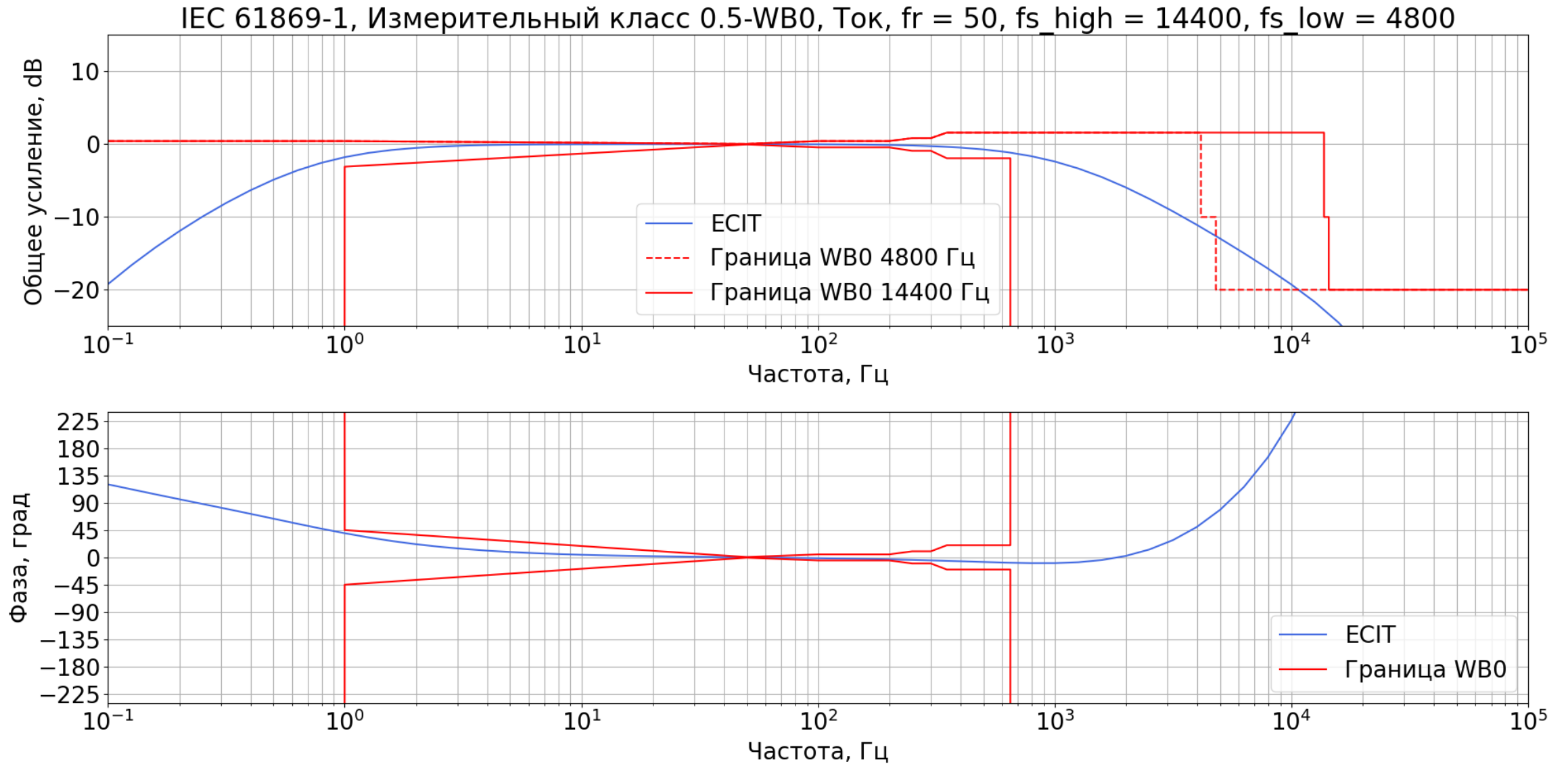
Кроме номинального класса точности вводятся расширение класса точности для гармоник. Для всех маломощных измерительных трансформаторов (LPIT) и устройств сопряжения с шиной процесса (SAMU) расширение класса точности должно быть не менее WB0.

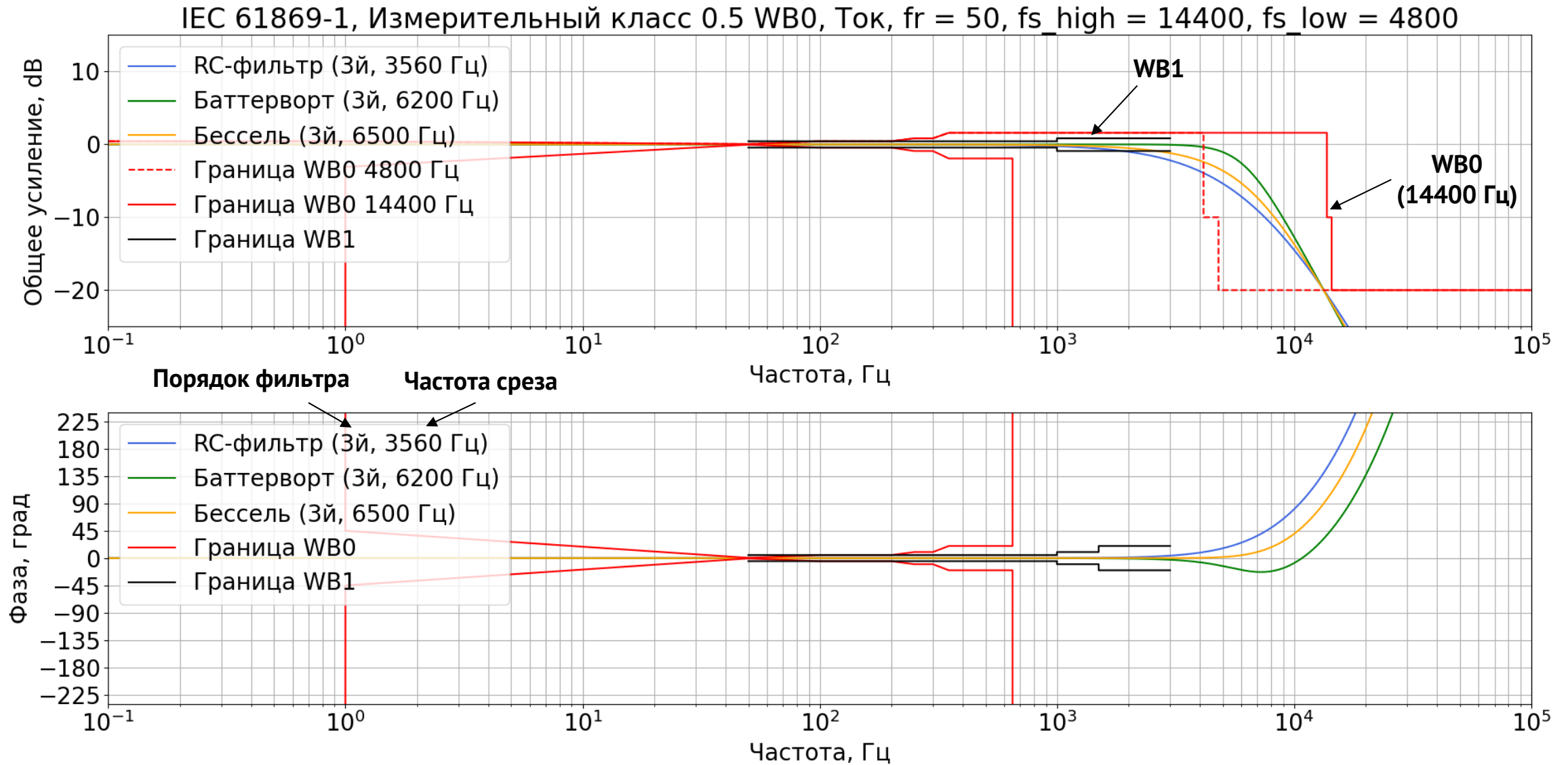
Класс **0,5-WB0** и класс **0,2-WB1**

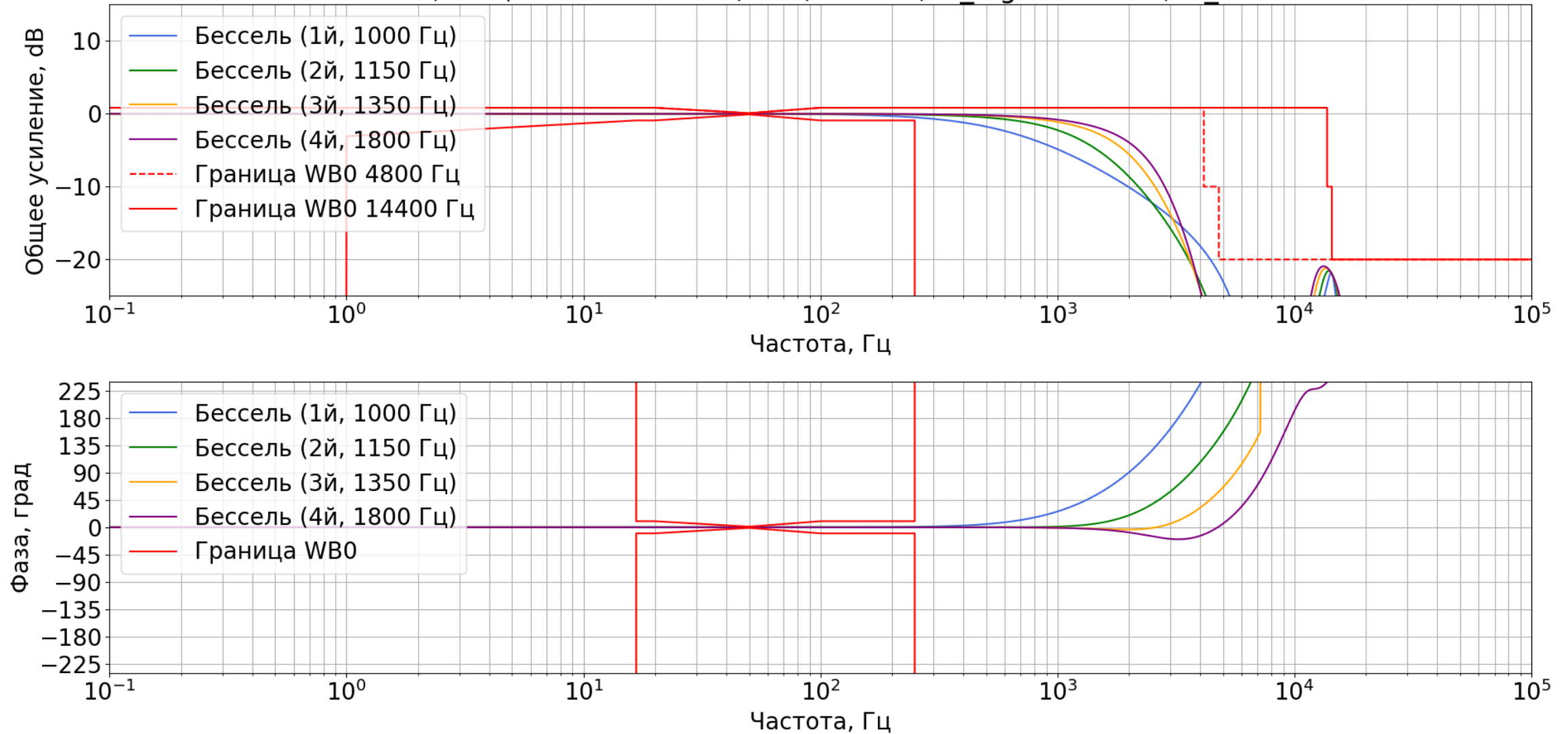
Номинальный
класс точности*

Расширение
класса точности

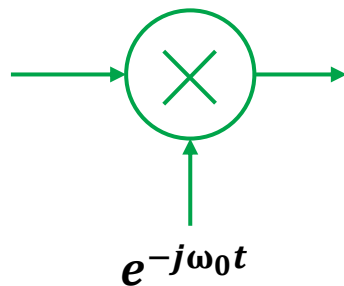
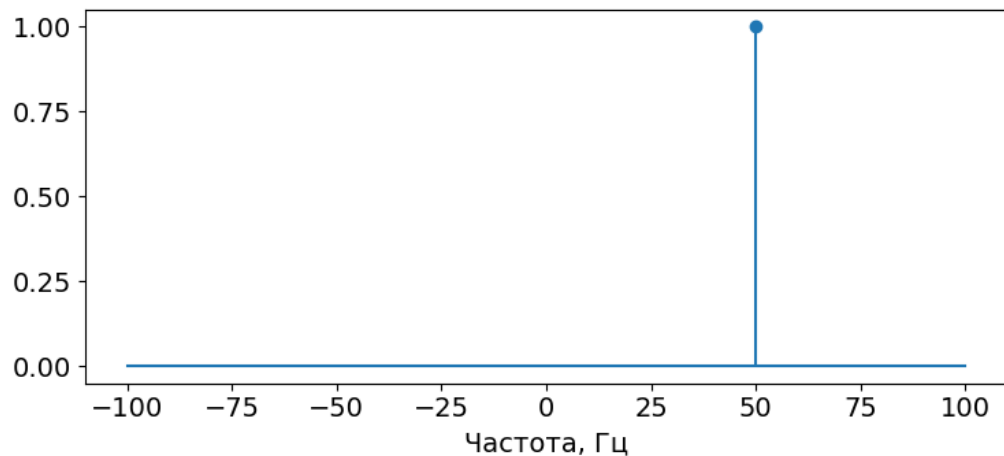
*Номинальный класс точности определяет погрешность в диапазоне от 99% до 101% номинальной частоты у измерительных классов точности и от 96% до 102% номинальной частоты у защитных классов точности.



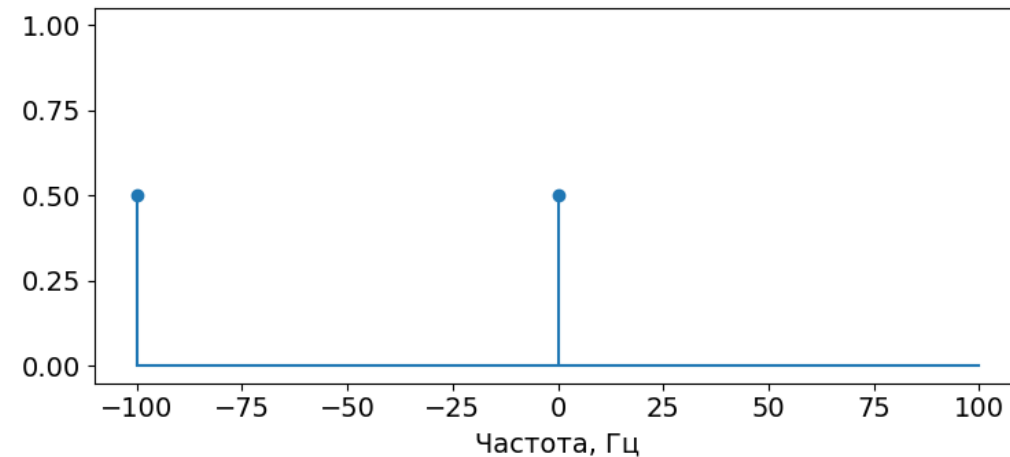


IEC 61869-1, Защитный класс 5P, Ток, $f_r = 50$, $f_{s_high} = 14400$, $f_{s_low} = 4800$ 

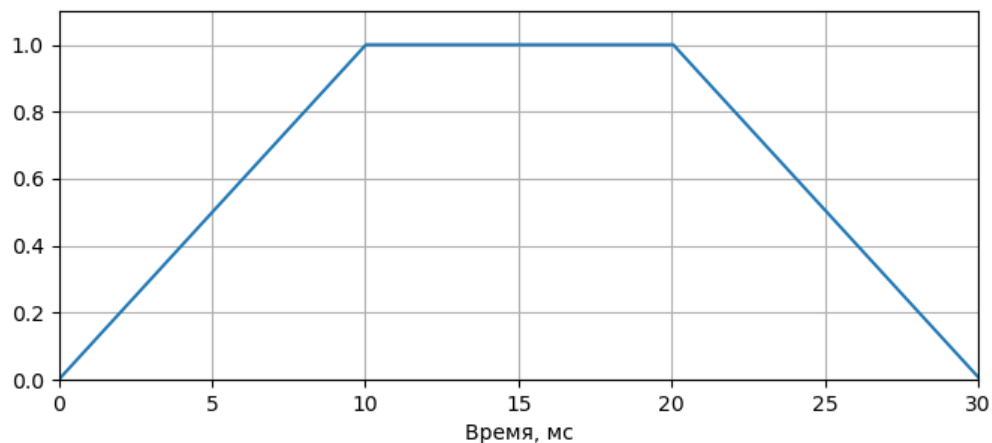
Исходный сигнал



Смещенный сигнал

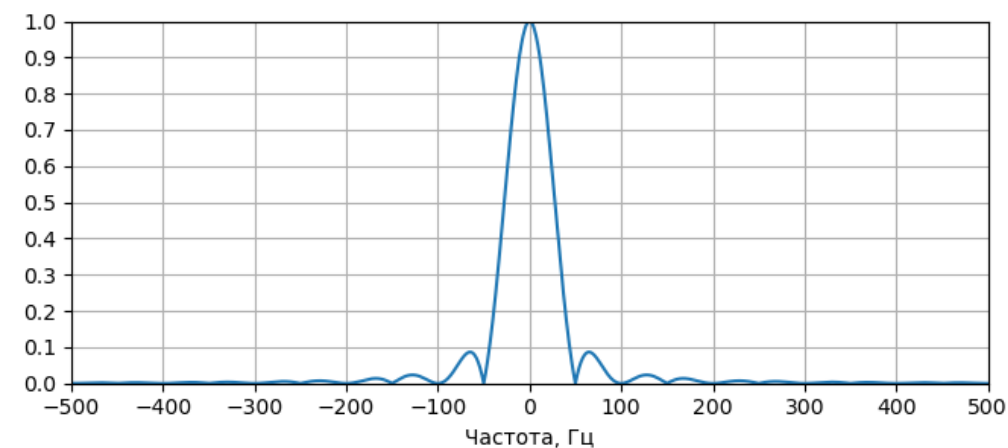


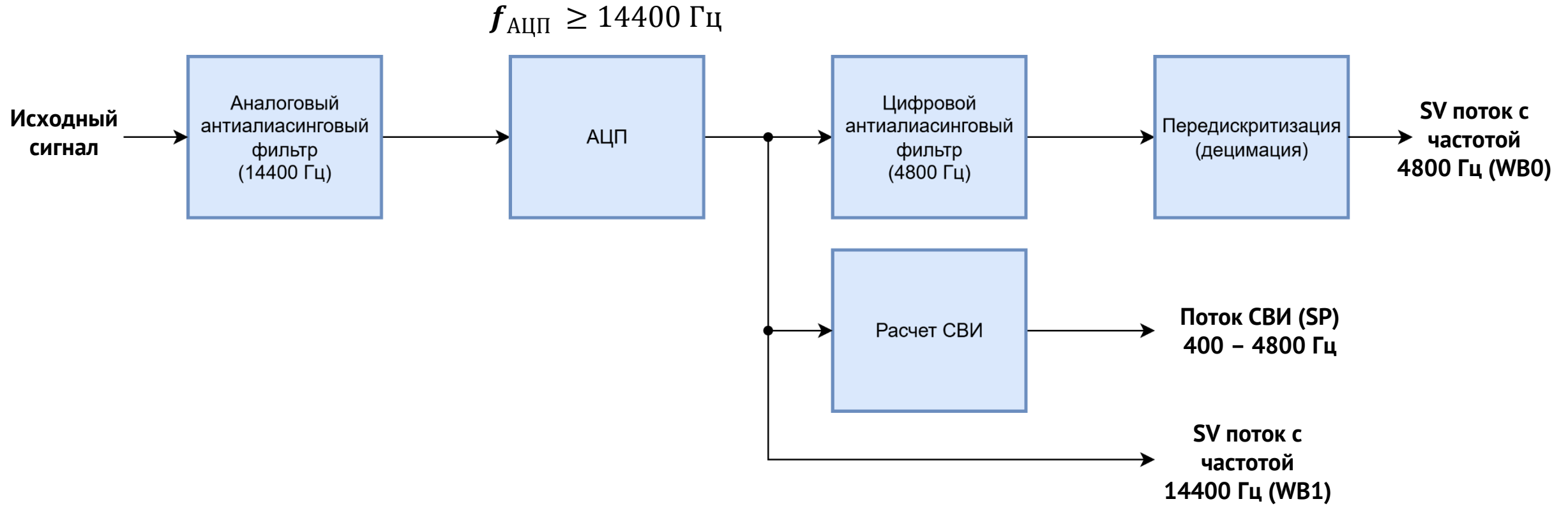
Импульсная функция усредняющего фильтра



FFT →

Частотная характеристика фильтра





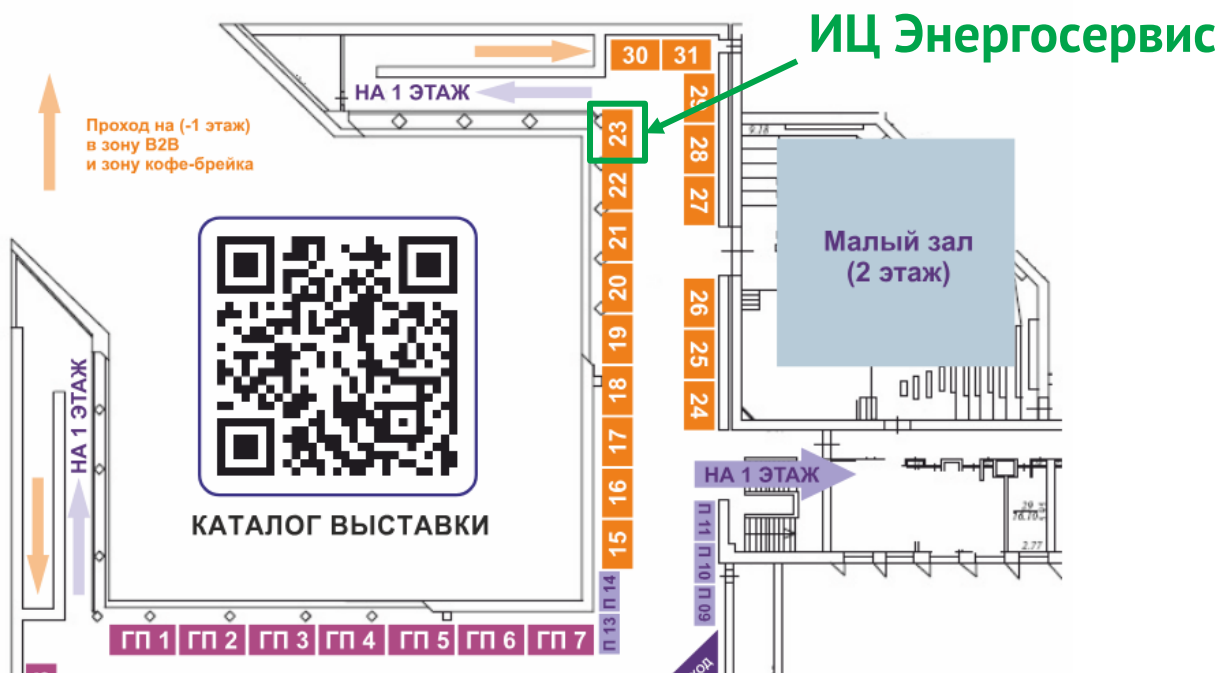
- Структура аналого-цифрового тракта позволяет обеспечивать требования для измерительного класса WB1 на частоте 14400 Гц и требования защитного класса на частоте 4800 Гц при передаче SV-потока.
- В трансформаторе реализуется возможность передачи как нескольких SV-потоков, так и потока синхронизированных векторных измерений (SP-потока).
- Многоканальная аналоговая структура измерения тока позволяет выдавать как интегрированные потоки с катушки Роговского, так и дифференцированный сигнал с катушки Роговского с минимальной фильтрацией.
- Возможность расчета SP-потока высших гармоник для алгоритмов РЗА на базе сигнала на частоте 14400 Гц.



II Всероссийская научно-техническая конференция
«Новые технологии в релейной защите и
автоматизации энергетических систем»



Цифровой измерительный комбинированный трансформатор с синхронизированными векторными измерениями



Спасибо за внимание!

Докладчик: **Андреев Павел Игоревич**
Организация: **Северный (Арктический)
Федеральный Университет (САФУ),
ИЦ «Энергосервис»**

Контактная информация: p.andreev@ens.ru

Table 7 – WB0 extension level for harmonics

Accuracy class	Ratio error at low frequency		Ratio error at harmonics based on f_r				Phase error at low frequency	Phase error at harmonics based on f_r			
	%		%				Degrees	Degrees			
	DC ^a	1 Hz	2 nd to 4 th	5 th and 6 th	7 th to 9 th	10 th to 13 th	1 Hz	2 nd to 4 th	5 th and 6 th	7 th to 9 th	10 th to 13 th
0,1	+1 -100	+1 -30	±1	±2	±4	±8	±45	±1	±2	±4	±8
0,2 – 0,2 S ^b	+2 -100	+2 -30	±2	±4	±8	±16	±45	±2	±4	±8	±16
0,5 – 0,5 S ^b	+5 -100	+5 -30	±5	±10	±20	±20	±45	±5	±10	±20	±20
1 – 3 – 5	+10 -100	+10 -30	±10	±20	±20	±20	±45	±10	±20	±20	±20

^a DC coupling is allowed but not required.

^b The accuracy classes 0,2 S and 0,5 S apply only for current transformers.

Table 8 – Accuracy class extensions for wide bandwidth applications

Accuracy class	Ratio error at frequencies shown below			Phase error at frequencies shown below		
	%			Degrees		
	$f_r < f \leq 1$ kHz	$1 < f \leq 1,5$ kHz	$1,5 < f \leq 3$ kHz	$f_r < f \leq 1$ kHz	$1 < f \leq 1,5$ kHz	$1,5 < f \leq 3$ kHz
WB1	$f_r < f \leq 1$ kHz	$1 < f \leq 1,5$ kHz	$1,5 < f \leq 3$ kHz	$f_r < f \leq 1$ kHz	$1 < f \leq 1,5$ kHz	$1,5 < f \leq 3$ kHz
WB2	$f_r < f \leq 5$ kHz	$5 < f \leq 10$ kHz	$10 < f \leq 20$ kHz	$f_r < f \leq 5$ kHz	$5 < f \leq 10$ kHz	$10 < f \leq 20$ kHz
WB3	$f_r < f \leq 20$ kHz	$20 < f \leq 50$ kHz	$50 < f \leq 150$ kHz	$f_r < f \leq 20$ kHz	$20 < f \leq 50$ kHz	$50 < f \leq 150$ kHz
WB4	$f_r < f \leq 50$ kHz	$50 < f \leq 150$ kHz	$150 < f \leq 500$ kHz	$f_r < f \leq 50$ kHz	$50 < f \leq 150$ kHz	$150 < f \leq 500$ kHz
0,1	±1	±2	±5	±1	±2	±5
0,2 – 0,2 S	±2	±4	±5	±2	±4	±5
0,5 – 0,5 S	±5	±10	±10	±5	±10	±20
1	±10	±20	±20	±10	±20	±20
Protection	±10	±20	±30	-	-	-

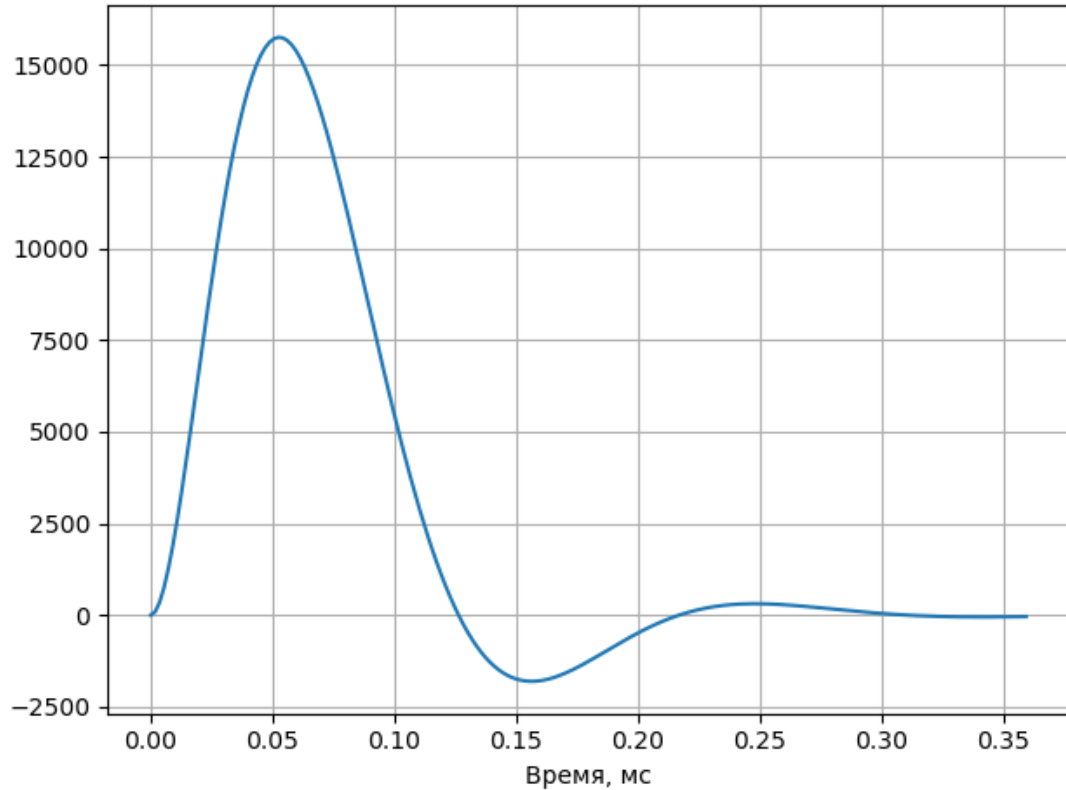
The accuracy classes 0,2 S and 0,5 S apply only for current transformers.

Table 9 – Harmonic requirements for protection accuracy classes

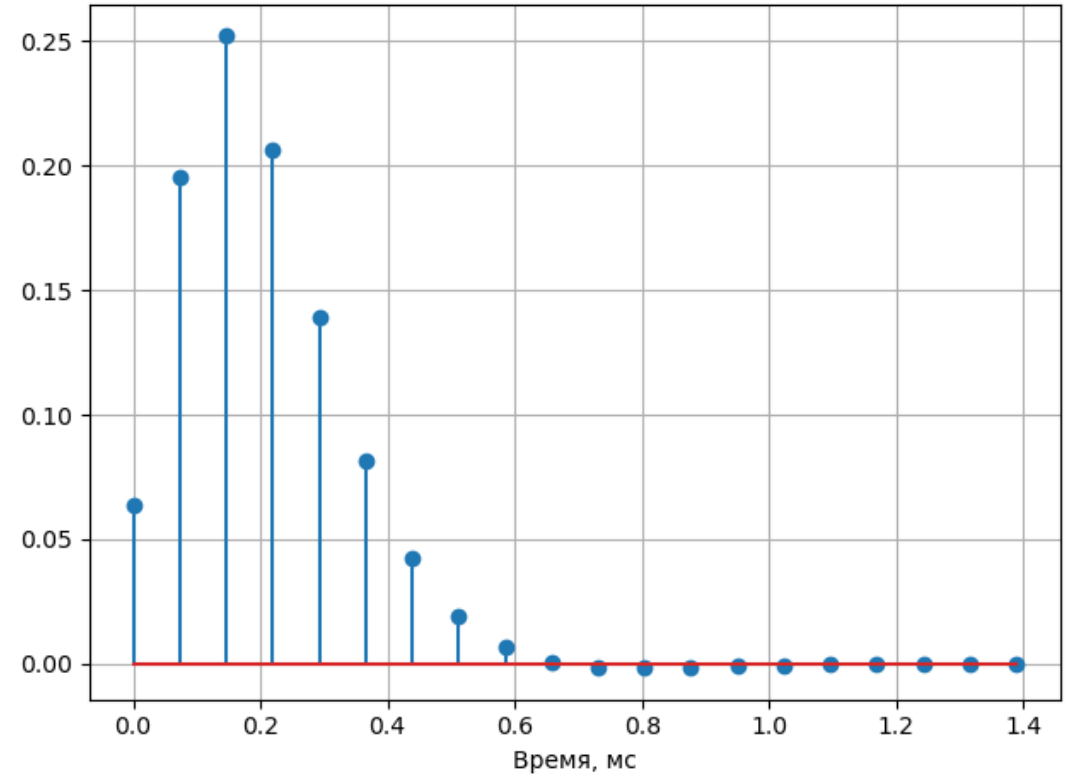
Ratio error at low frequency		Ratio error at frequencies and harmonics shown below, based on f_r		Phase error at low frequency	Phase error at frequencies and harmonics shown below, based on f_r	
%		%		Degrees	Degrees	
DC	1 Hz	1/3 rd component (16,7 Hz or 20 Hz)	2 nd to 5 th harmonic	1 Hz	1/3 rd component (16,7 Hz or 20 Hz)	2 nd to 5 th harmonic
+10 -100	+10 -30	±10	±10	-	±10	±10

Table 10 – Anti-aliasing filter requirements

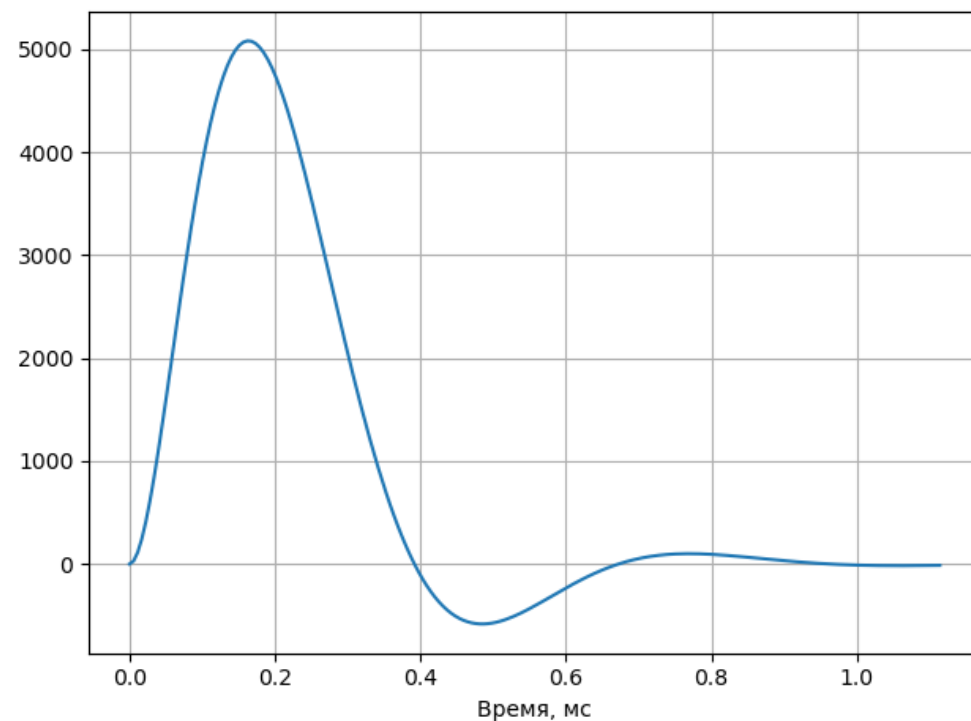
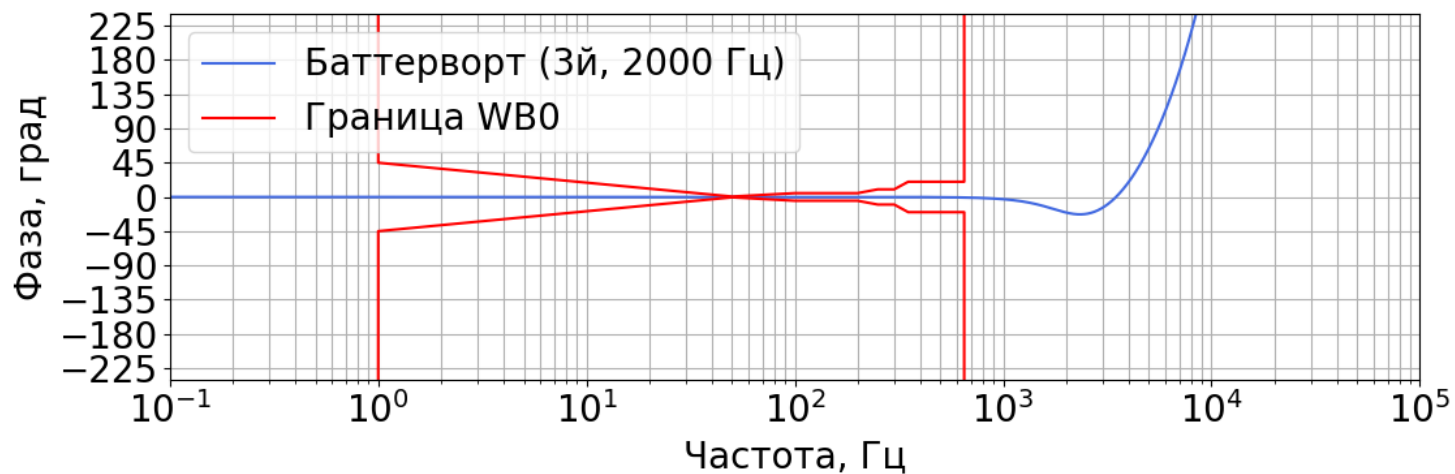
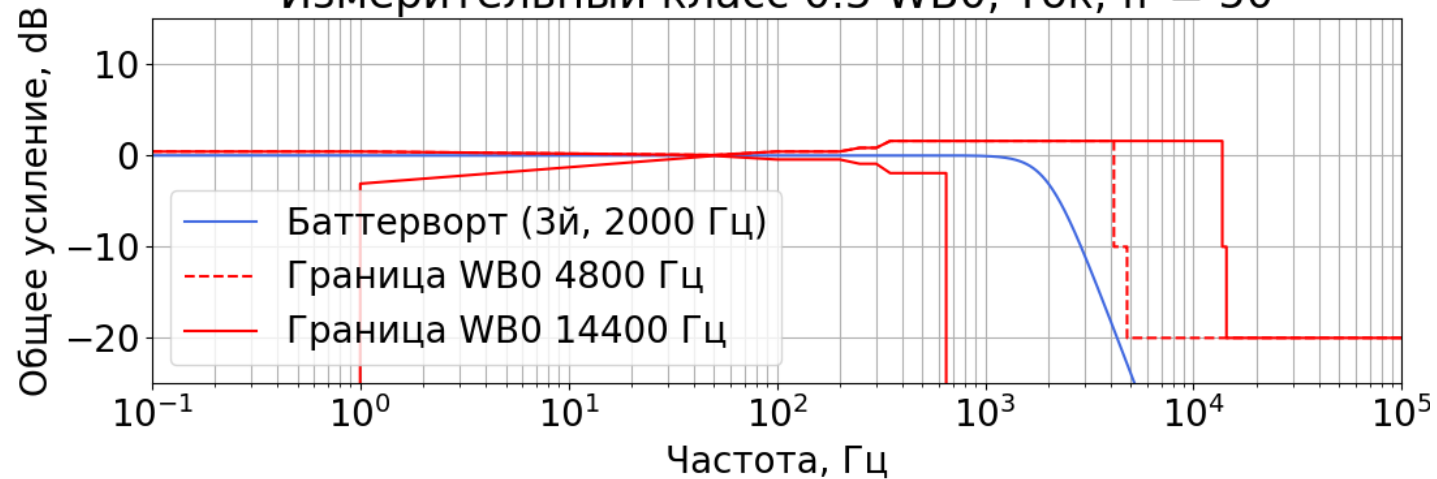
Accuracy class	Anti-aliasing filter attenuation guarding frequencies up to 13 th harmonic $(f_s - 13 \times f_r \leq f < f_s - f_r)$	Anti-aliasing filter attenuation guarding the fundamental $(f_s - f_r \leq f)$
0,1	≥ 17 dB	≥ 34 dB
0,2	≥ 14 dB	≥ 28 dB
0,5	≥ 10 dB	≥ 20 dB
1	≥ 10 dB	≥ 20 dB
Protection classes	≥ 10 dB	≥ 20 dB



**Импульсная функция
аналогового фильтра
Баттерворд (3й, 6200 Гц)**



**Импульсная функция
цифрового фильтра
Бессель (2й, 1150 Гц)**

Измерительный класс 0.5-WB0, Ток, $f_r = 50$ 

**Импульсная функция аналогового фильтра
Баттерворт (3й, 2000 Гц)**

Измерительный класс 0.5-WB0, Ток, $f_r = 50$ 