



**XV Международная
научно-техническая конференция
«ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА
ГЛАЗАМИ МОЛОДЕЖИ - 2026»**



**Проблематика выбора первичных
преобразователей тока в измерительных
трансформаторах**

*Направление 3
РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИКА
ЭНЕРГОСИСТЕМ*

Докладчик: Андреев Павел Игоревич
Организация: Северный (Арктический)
федеральный университет (САФУ), ИЦ
«Энергосервис»

Руководитель: Мокеев А.В., д.т.н., доцент

**Иваново,
23 – 27 марта 2026 г.**

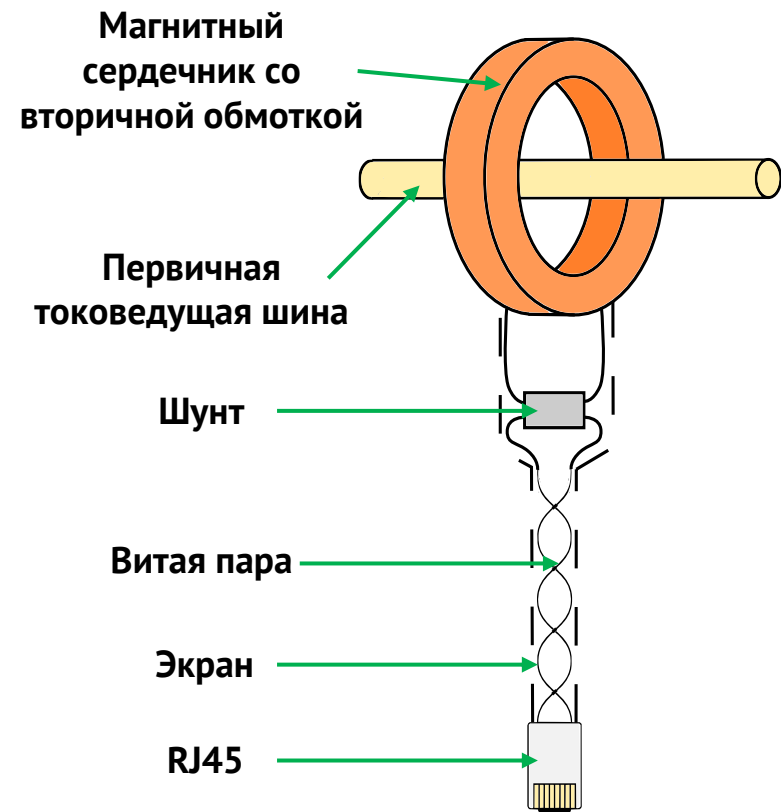
Электромагнитный трансформатор тока



- Формирует на выходе ток пропорциональный первичному току
- Точность заявляется для определенной рабочей точки 5(1) А при определенном номинальном первичном токе
- Стандарт IEC61869-2
- Высокая выходная мощность
- Большие габариты
- Проблемы с насыщением и гистерезисом сердечника
- Узкий диапазон точности
- Опасность появления высокого напряжения при случайном размыкании вторичной цепи

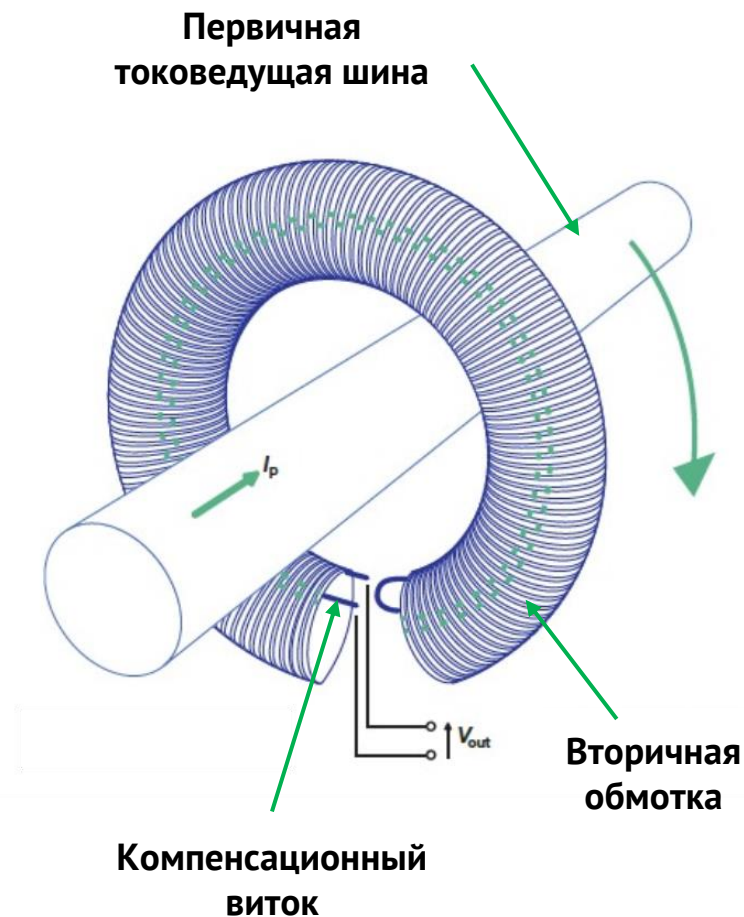
Маломощный трансформатор тока (LPCT)

- Маломощный трансформатор тока с интегрированным шунтом
- Выход напряжения (мВ) пропорционально первичному току
- Работает с электронными реле с большим входным сопротивлением (≥ 2 кОм или ≥ 20 кОм)
- Стандарт IEC61869-10
- Точность определена для широкого диапазона первичных токов
- Защитный и измерительный классы точности (5P и 0,5)
- Проблемы с насыщением и гистерезисом сердечника
- Требуется экранирование и усиление выходного сигнала
- Возможен перегрев шунта



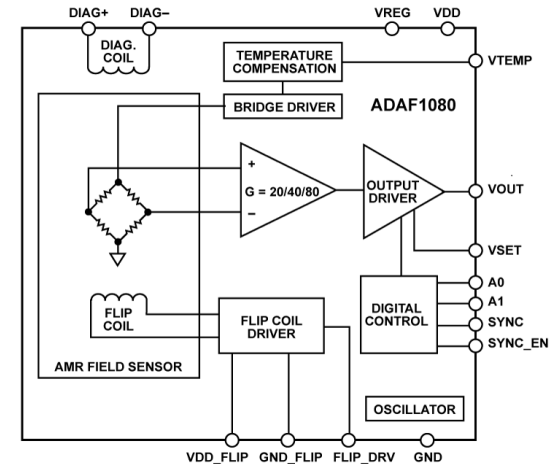
Катушка Роговского

- Названа в честь Вальтера Роговского (Walter Rogowski and Wilhelm Steinhaus, публикация 1912).
- Современная катушка реализована как тороидальная катушка или катушка на печатных платах
- Выход напряжения пропорциональный первой производной от первичного тока ($< 1 \text{ мВ/А}$)
- Стандарт IEC 61869-10
- Нет магнитного сердечника (высокая линейность без насыщений)
- Требуется восстановления сигнала, интегратора
- Малые уровни выходного сигнала требуют усиления и экранирования

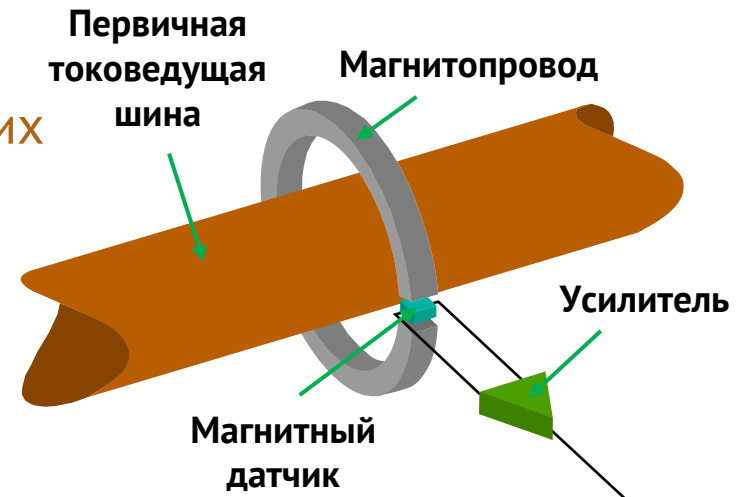


Дополнительно может быть экран для защиты от наводок электрического поля

- Производят такие компании как Analog Devices, Honeywell, Infineon, TE Connectivity...
- Может располагаться на токоведущей шине или работать в системе с магнитопроводом
- Измеряет постоянное и переменное магнитное поле (DC/AC)
- Высокая чувствительность к магнитному полю
- Чувствительность к магнитным наводкам от соседних фаз
- Нарушение ориентации доменов при высоких магнитных полях, требует восстановления с помощью внутренней схемы



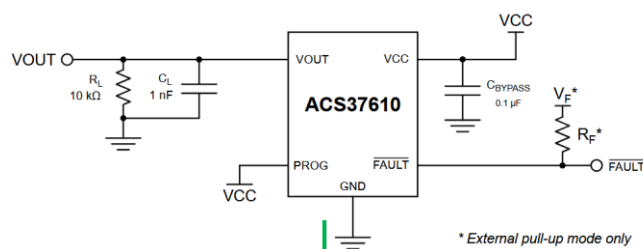
ADAF1081



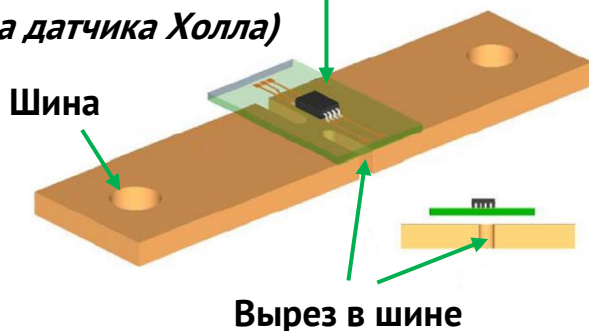
<https://www.analog.com/en/products/ADAF1080.html>

● <https://www.allegromicro.com/en/insights-and-innovations/technical-documents/hall-effect-sensor-ic-publications/achieving-closed-loop-accuracy-in-open-loop-current-sensors>

- Много производителей таких как Allegro, Melexis, TI, Honeywell...
- Измеряет постоянное и переменное магнитное поле (DC/AC)
- Чувствительность к магнитным наводкам от соседних фаз
- Температурная зависимость (микросхемы с компенсацией)
- Смещение постоянной составляющей выходного сигнала (offset)

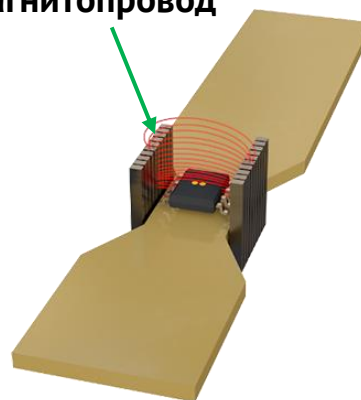


Топология Coreless
(два датчика Холла)



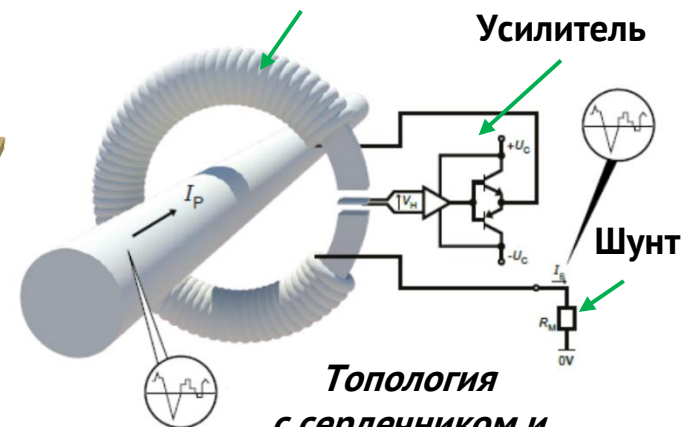
Топология с магнитопроводом U-core

Магнитопровод



Компенсирующая обмотка

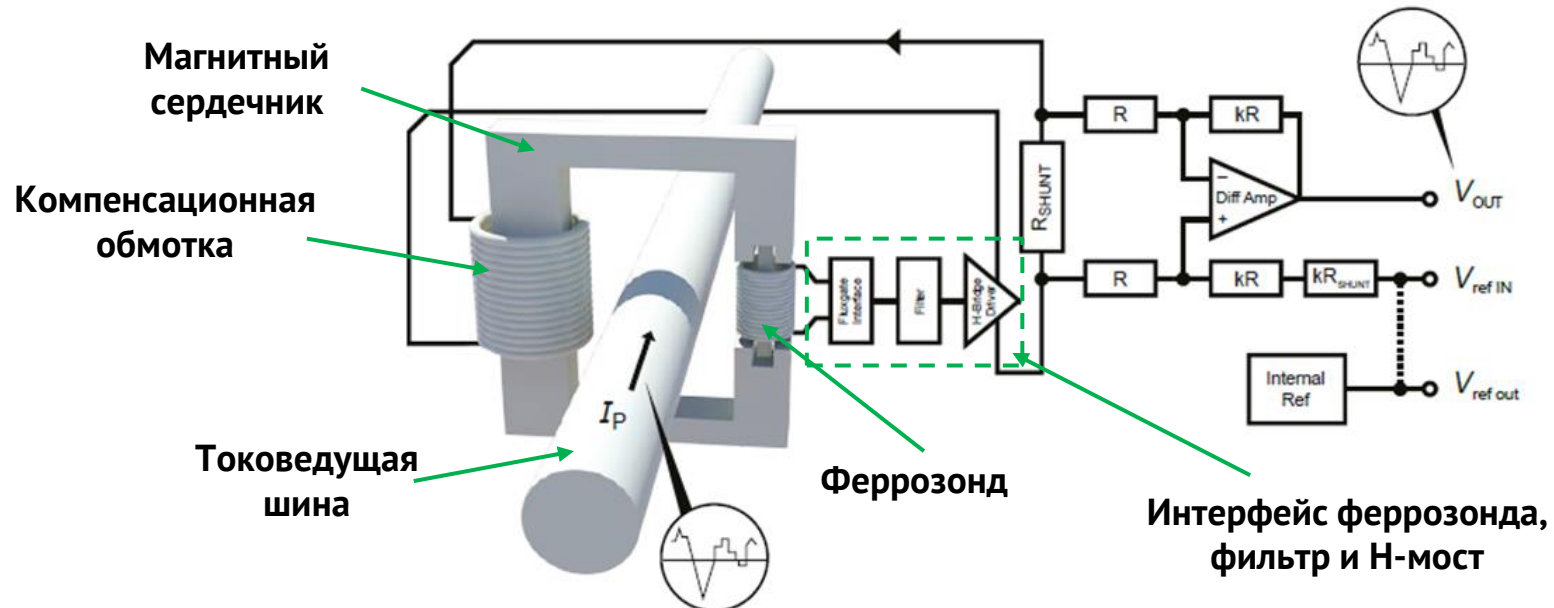
Усилитель



Топология с сердечником и обратной связью (zero-flux)

Феррозонды (Fluxgate)

- Измеряет постоянное и переменное магнитное поле (DC/AC)
- Высокая температурная стабильность ($< 1 \text{ ppm}$)
- Высокая линейность ($< 2 \text{ ppm}$)
- Сложность конструкции (могут использоваться три отдельных сердечника, требует специального интерфейса и фильтрации)
- Колебания выходного сигнала в режимах насыщения (sweep mode)

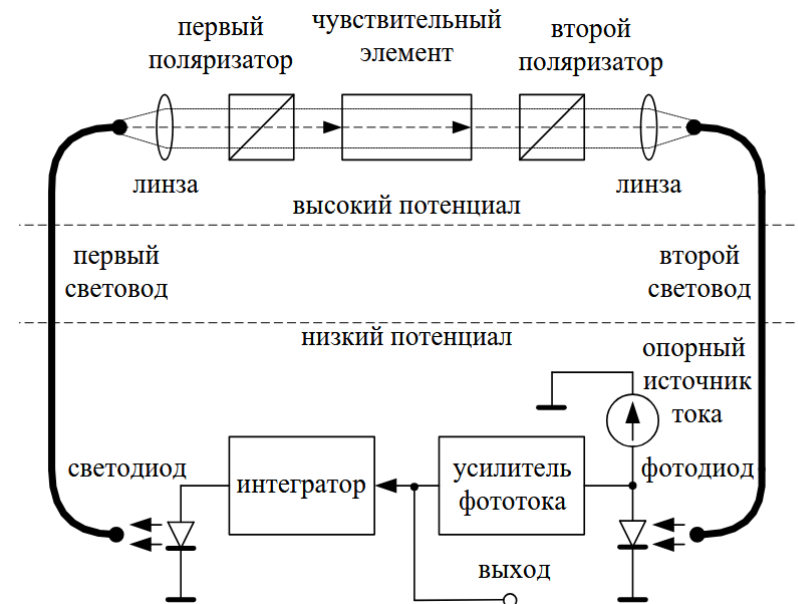


Шунты



- Сплавы медь-марганец (Cu-Mn), например **Manganin**, обеспечивают высокую температурную стабильность (15 – 200 ppm)
- Широкий диапазон частот
- Измеряет постоянное и переменное магнитное поле (DC/AC)
- Нет гальванической развязки
- Могут перегреваться при аварийных токах
- Экранирование выходного сигнала (75 мВ) и его измерение трудновыполнимо при высоких напряжениях первичной цепи

- Работают на изменении угла поляризации (Эффект Фарадея)
- Используется специализированный оптический кабель или призмы с высокой магнитооптической постоянной Верде
- Устойчивость к помехам
- Широкий диапазон частот
- Измеряет постоянное и переменное магнитное поле (DC/AC)
- Соединительные световоды являются частью измерительной системы, требуется совместная калибровка
- Температурный дрейф
- Чувствительность к вибрациям
- Выходной сигнал при конструкции с двумя поляризаторами пропорционален синусу от угла поворота вектора поляризации



Сравнительная таблица

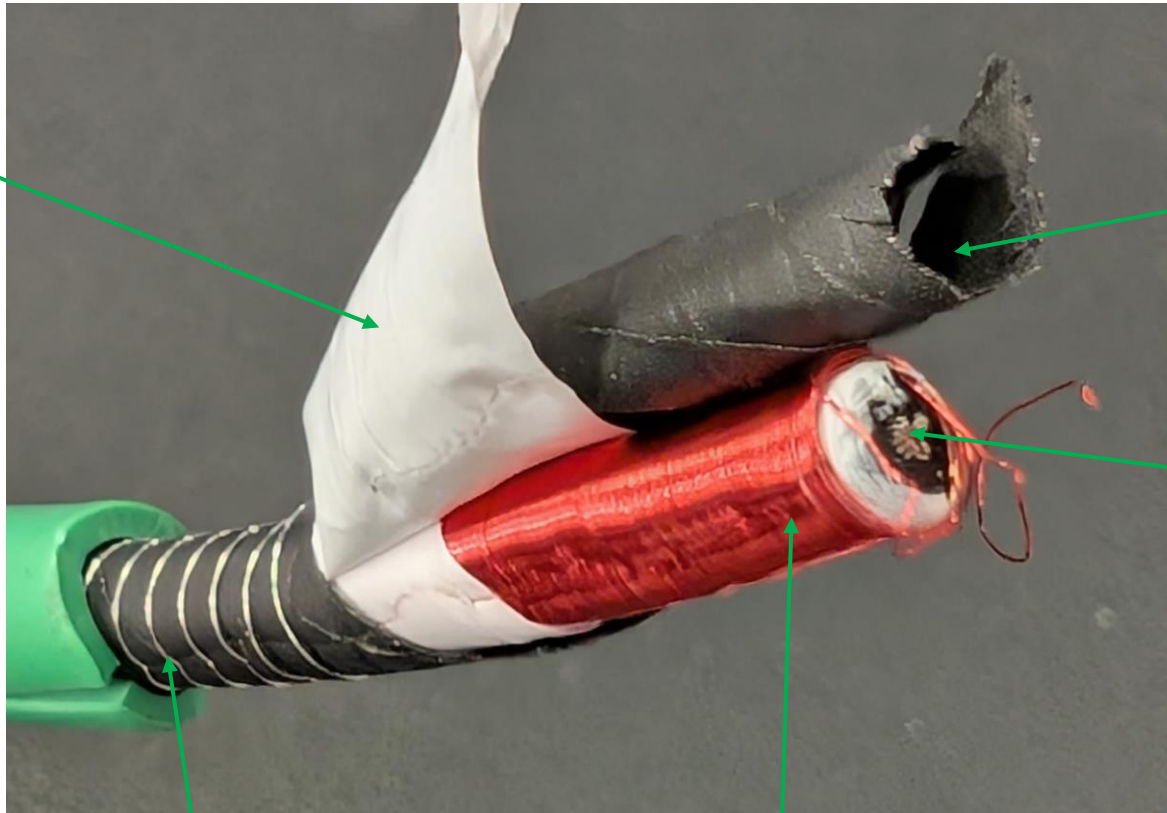
Параметр	Электромагнитный ТТ	ЛРСТ	Катушка Роговского	MR-датчик	Датчик Холла	Феррозонд	Шунт	Оптический Датчик
Линейность	Гистерезис	Гистерезис	Высокая	Средняя	Средняя	Высокая	Высокая	$\sin(\theta)$
DC/AC	AC	AC	AC	DC/AC	DC/AC	DC/AC	DC/AC	DC/AC
Гальваническая развязка	+	+	+	+	+	+	-	+
Габариты	Большие	Средние	Средние	Малые	Малые	Средние	Малые	Средние
Выходная мощность	Высокая	Низкая	Низкая	Нет	Нет	Низкая	Низкая	Нет
Температурная стабильность	Высокая	Средняя	Средняя	Треб. комп.	Треб. комп.	Высокая	Высокая	Треб. комп.
Экранирование	Нет	Да	Да	Да	Да	Да	Да	Нет
Влияние соседних фаз	Низкое	Низкое	Среднее	Высокое	Высокое	Низкое	Низкое	Низкое
Частотный диапазон	Узкий (50/60 Гц)	Узкий	Широкий	Средний	Средний	Средний	Широкий	Широкий

Рекомендации по выбору

Применение	Рекомендуемый тип
Энергоучёт (50/60 Гц)	ТТ, LPCT, катушка Роговского
Защита и автоматика	LPCT, катушка Роговского, феррозонд, ТТ
Измерение постоянного тока	Шунт, датчик Холла, феррозонд, магниторезистивный датчик, оптический датчик
Высокие частоты/импульсы	Катушка Роговского, шунт, оптический датчик
Компактные устройства	Датчик Холла, магниторезистивные датчики, катушка Роговского
Прецизионные измерения	ТТ, Шунт, феррозонд

Экранирование катушки Роговского

Фторопластовая
прокладка



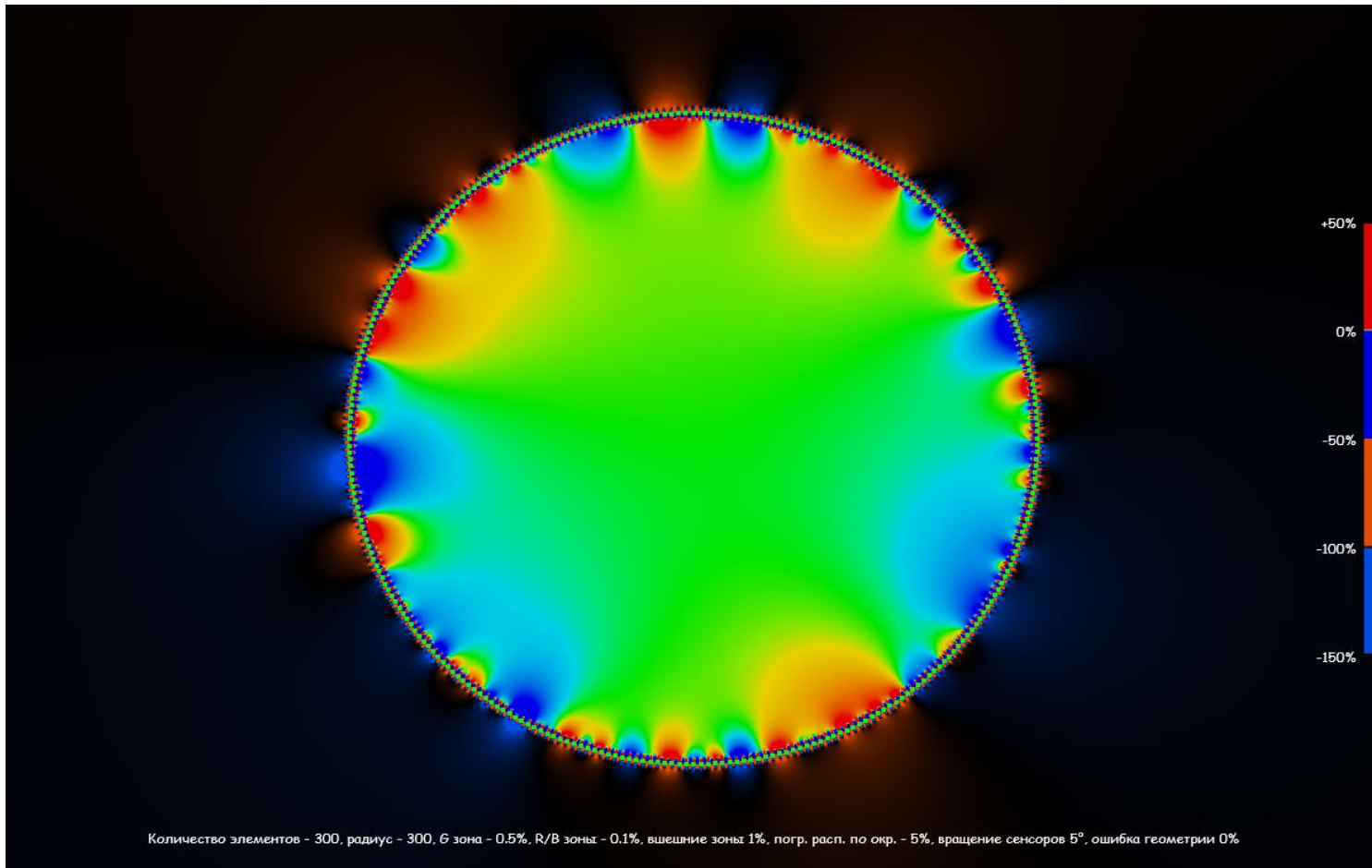
Токопроводящий
экран

Компенсационный
виток

Токопроводящая
проволока

Измерительная
обмотка

Визуализация погрешностей при неточной намотке катушки Роговского



IEC 61869-10 (ГОСТ Р 59408-2021). Величина наводки не должна превышать $1/3$ пределов погрешности согласно заявленному классу точности на расстоянии изоляции.

Ограничение операционного усилителя

Упрощенно, без учета параметров схемы замещения, амплитуда выходного напряжения идеализированной катушки Роговского на прямоугольном сердечнике:

$$\varepsilon_{amp}(f) = \mu_0 N I_{amp} f h \ln\left(\frac{b}{a}\right),$$

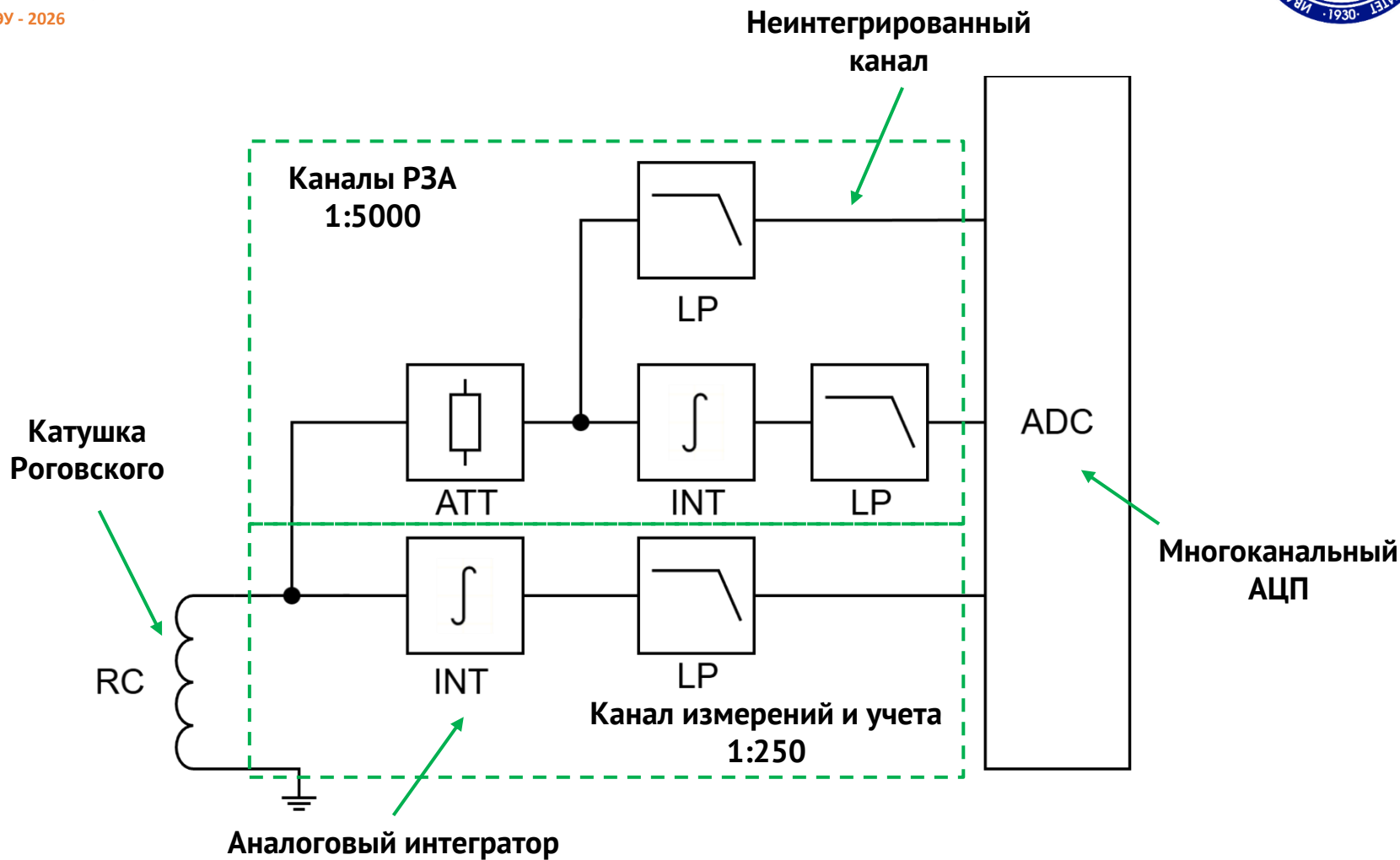
где μ_0 – магнитная постоянная, N – количество витков, I_{amp} – амплитудное значение измеряемого тока, f – частота измеряемого тока, h – высота сердечника, b – внешний радиус, a – внутренний радиус.

Ограничение из-за питания операционного усилителя (ОУ):

$$G \cdot \varepsilon_{amp}(f) \leq U_{power} - U_{offset},$$

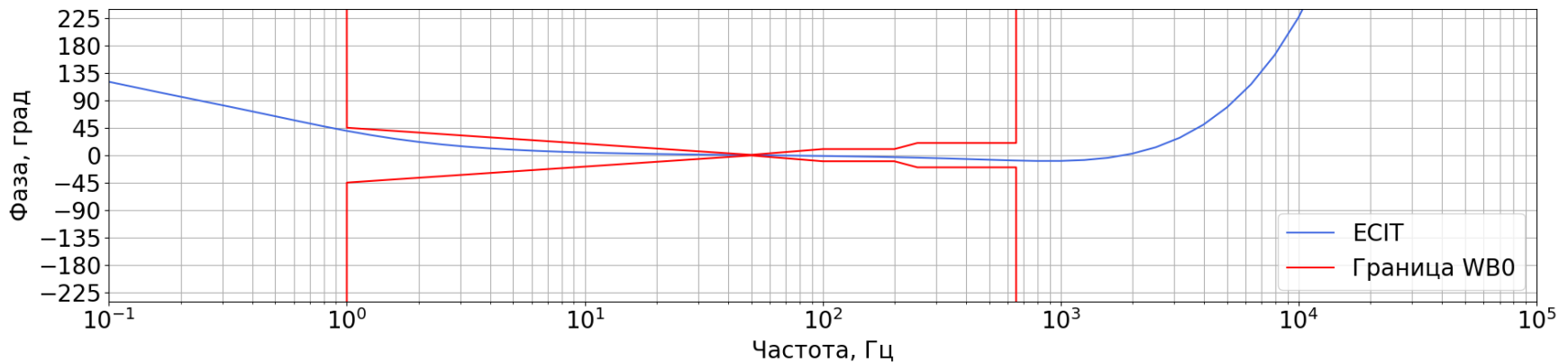
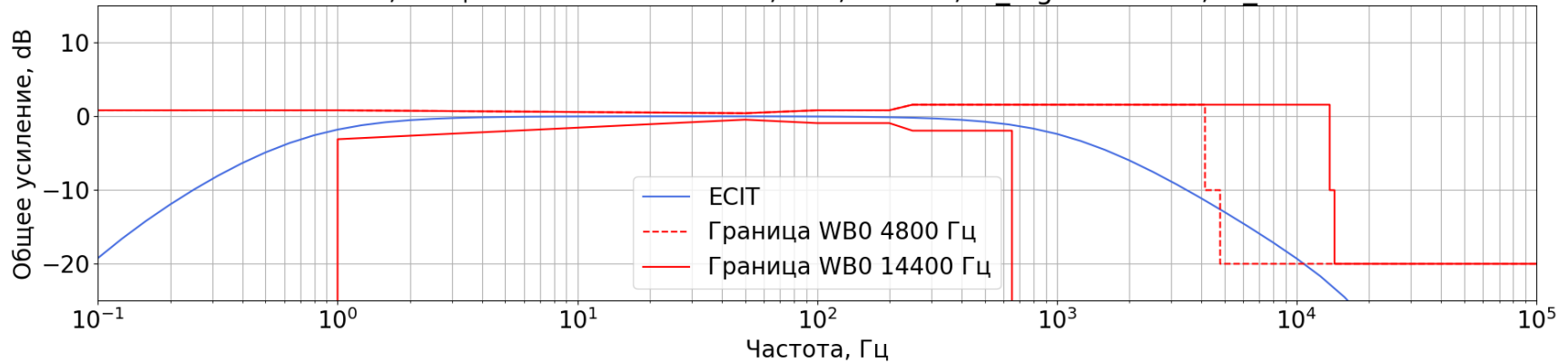
где G – коэффициент усиления / подавления сигнала с катушки, U_{power} – питание операционного усилителя, U_{offset} – смещение в зависимости от конструкции ОУ, для Rail-to-Rail операционных усилителей оно близко к 0.

Многоканальность



Антиалиасинговый фильтр

IEC 61869-1, Защитный класс 5P WB0, Ток, $f_r = 50$, $f_{s_high} = 14400$, $f_{s_low} = 4800$



Для всех маломощных измерительных трансформаторов (LPIT) и устройств сопряжения с шиной процесса (SAMU) должно соблюдаться требования расширенного класса точности WB0.



ЕСИТ-1 внутренней
установки на
напряжение 15 - 35 кВ



ЕСИТ-1
наружной
установки
до 35 кВ



ЕСИТ-2
10 кВ

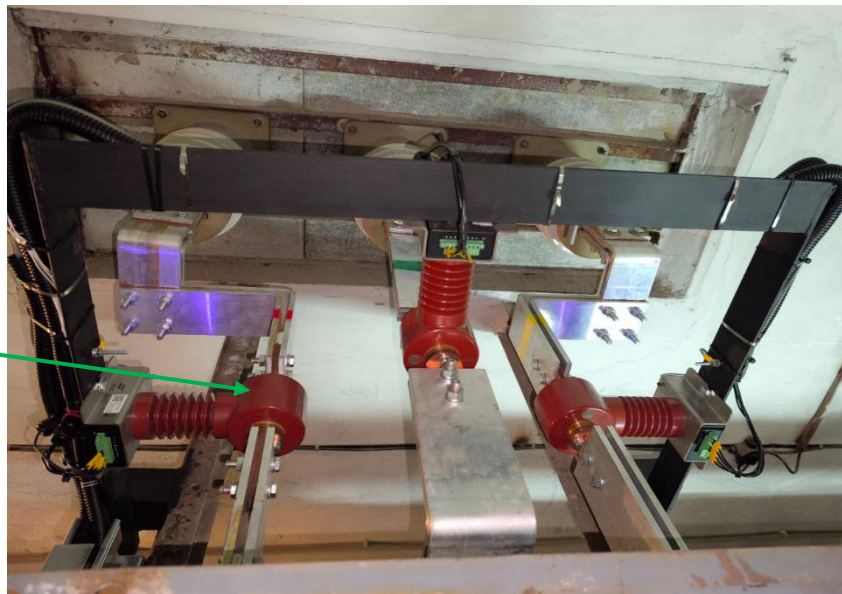


ЕСИТ-3 для КРУ
с элегазовой
изоляцией (КРУЭ)
до 35 кВ

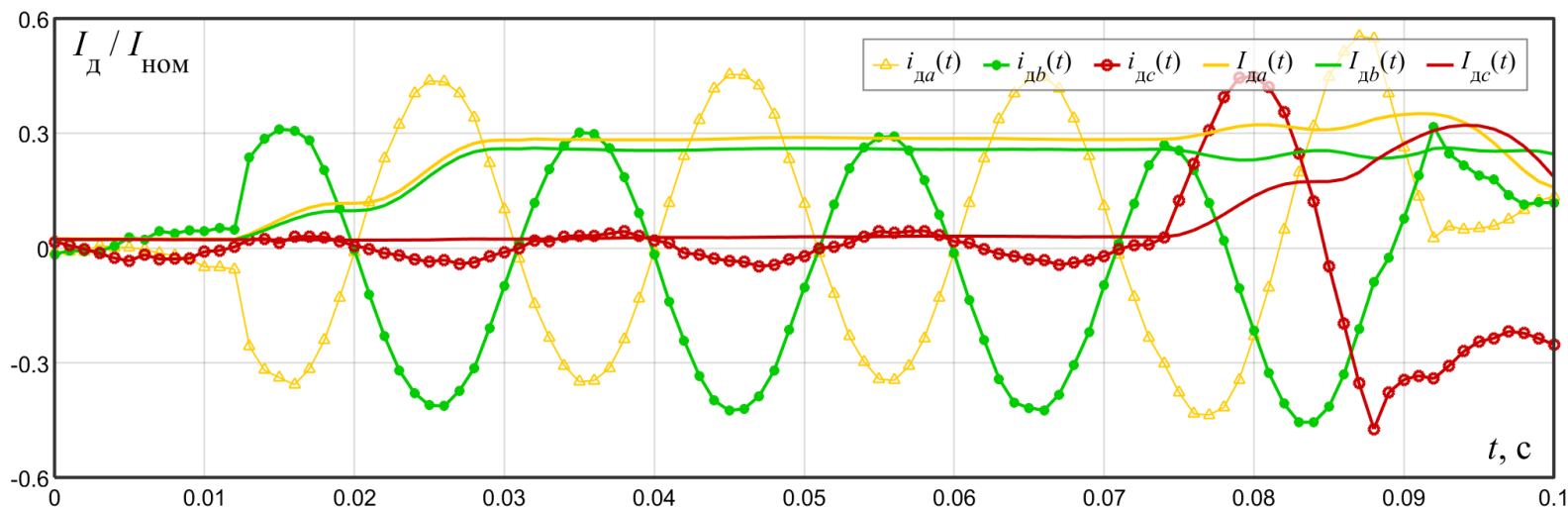
Цифровой комбинированный измерительный трансформатор ЕСИТ-1
внесен с реестр средств измерений (Госреестр СИ 94207-24)

Применение ЕСИТ-1

ЕСИТ-1 на ПС 110 кВ
«Орбита»
(Комиэнерго), 10 кВ
н.р.=1000 А



Осциллограмма
дифференциального
тока при внешнем КЗ
за трансформатором





**XV Международная
научно-техническая конференция
«ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА
ГЛАЗАМИ МОЛОДЕЖИ - 2026»**



Проблематика выбора первичных преобразователей тока в измерительных трансформаторах

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

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

Контактная информация: p.andreev@ens.ru

Иваново,
23 – 27 марта 2026 г.