Особенности прохождения сигналов релейной защиты через первичные электромагнитные преобразователи тока

Директор по науке ООО «НПП Бреслер» д.т.н., профессор
Булычев Александр Витальевич

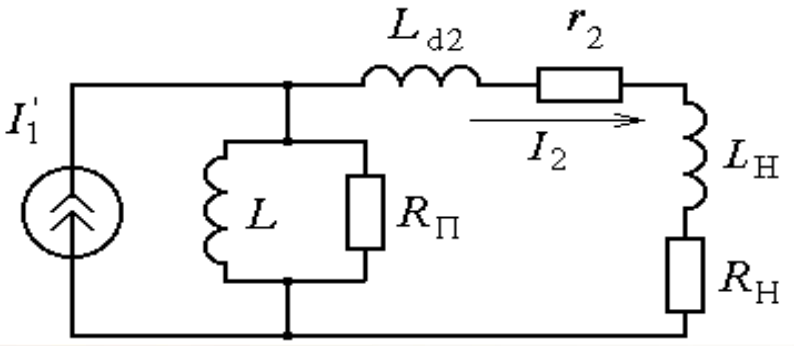
Москва, 23.11.22

Функции электромагнитного преобразователя тока

Допущения и ограничения:

- *Линейный режим работы.*
- *Частотный диапазон от 0 до 10 кГц.*
- *Влияние паразитных параметров пренебрежимо мало.*

Электромагнитный преобразователь тока (ЭМПТ) можно рассматривать как динамическое звено с передаточной функцией ***H(p)***, где входная величина – изображение по Лапласу первичного тока, выходная величина – изображение по Лапласу вторичного тока



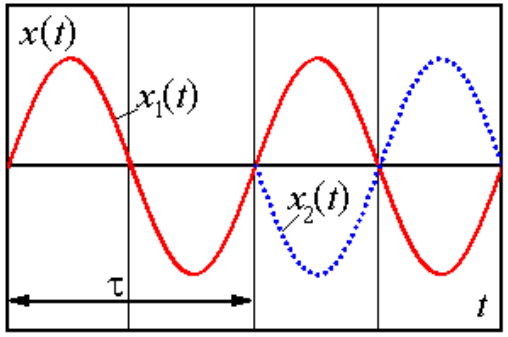
Функция преобразования: ток-ток

$$H_{TT}(p) = \frac{I_2(p)}{I_1'(p)} = \frac{bp}{a_2 p^2 + a_1 p + a_0}$$

Входной сигнал в виде отрезка синусоиды

$$x_1(t) = \begin{cases} \sin \omega_0 t & при \quad 0 \le t \le \tau; \\ 0 & при \quad t < 0, t > \tau. \end{cases}$$

$$x_2(t) = \begin{cases} (-1)^n \sin \omega_0 (t - \tau) & при \quad t - \tau \ge 0; \\ 0 & при \quad t - \tau < 0, \end{cases}$$



Реакция ЭМПТ на сигнал синусоидальной формы

Реакция ЭМПТ на входной сигнал *x(t)* представляет собой разность двух сигналов:

$$y(t) = y_1(t) - y_2(t)$$

$$y_1(p) = x_1(p) \cdot H_{\text{ТТ}}(p)$$

$$y_2(p) = x_2(p) \cdot H_{\text{ТТ}}(p)$$

Изображения входных сигналов

$$x_1(p) = \frac{\omega_0}{p^2 + \omega_0^2}$$

$$x_2(p) = \frac{\omega_0}{p^2 + \omega_0^2}(-1)^n$$

Реакция ЭМПТ на две составляющие входного сигнала

$$y_1(p) = \frac{T_0 b_1 p}{(T_0^2 p^2 + 1)(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}$$

$$y_1(t) = T_0 b_1 [-C \sin(\omega_0 t + \Theta) + C_1 e^{-\alpha_1 t} + C_2 e^{-\alpha_2 t}]$$

$$y_2(\delta) = (-1)^n [-C \sin(\omega_0 \delta + \Theta) + C_1 e^{-\alpha_1 \delta} + C_2 e^{-\alpha_2 \delta}] T_0 B_1$$

$$\Theta = -arctg \frac{T_1}{T_0} - arctg \frac{T_2}{T_0} - 90^o$$

Погрешность преобразования

Абсолютная погрешность преобразования мгновенных значений сигнала

$$\varepsilon(t) = K_{\text{ТТ}} x(t) - y(t)$$

$$\varepsilon(t) = x(t) - y(t)$$

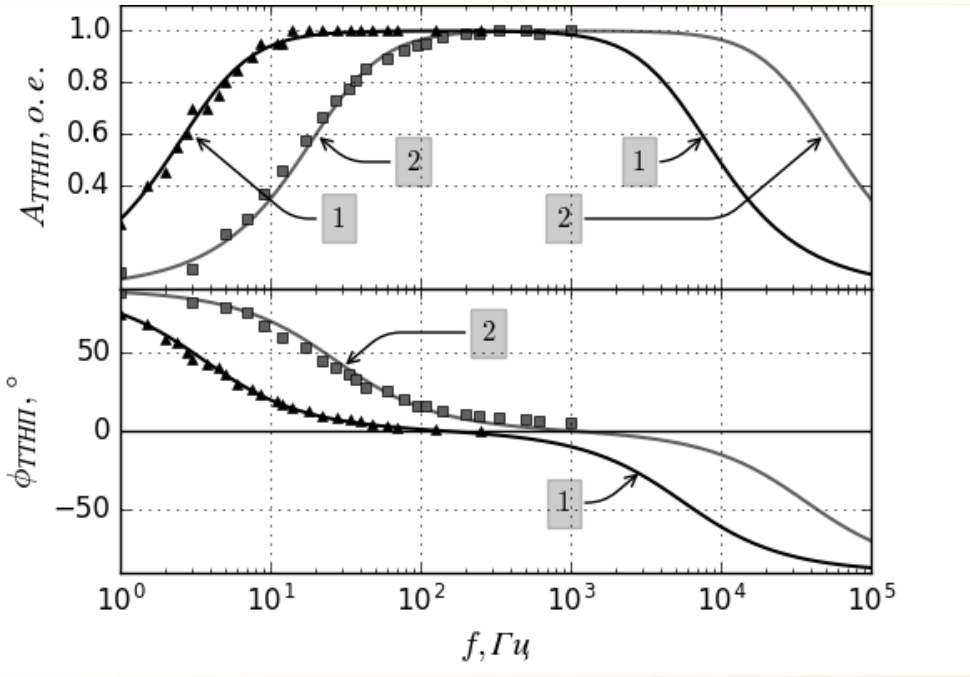
Связь погрешностей ЭМПТ с его параметрами можно установить используя граничные параметры частотных характеристик

$$f_{\text{Н}} = \frac{A_{\text{Н}}}{\sqrt{1 - A_{\text{Н}}^2}} \frac{R_2}{2\pi L} \qquad f_{\text{Н}} = \frac{1}{2\pi \tau_{\text{ТТ}} tg\varphi_{\text{Н}}}$$

Чем больше постоянная времени (отношение *L* / *R*, тем ниже нижняя граничная частота

$$\tau_{\text{ТТ}} = \frac{L}{R_2} \qquad T_1 = \frac{L}{R_2}$$

Частотные характеристики ЭМПТ

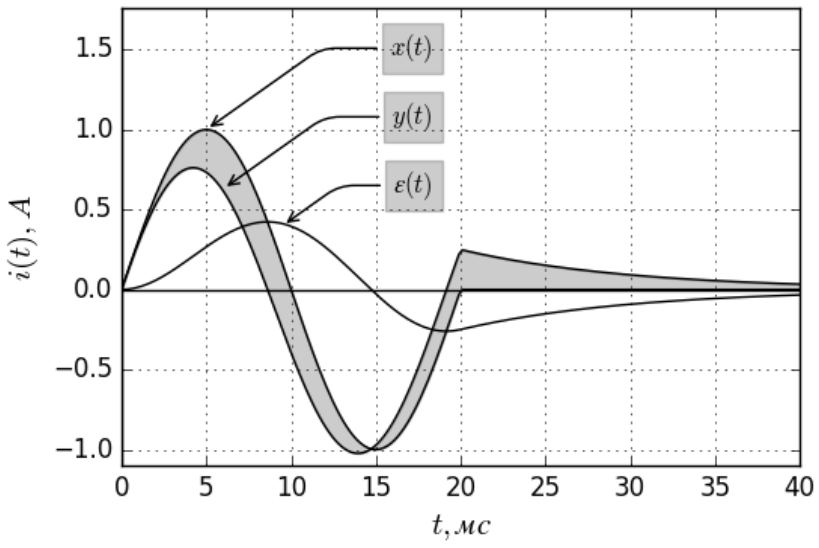


Увеличение T_1 вызывает снижение погрешности

$$\lim_{T_1 \to \infty} \varepsilon_1 = 0$$

Графический вид погрешностей преобразования сигнала синусоидальной формы

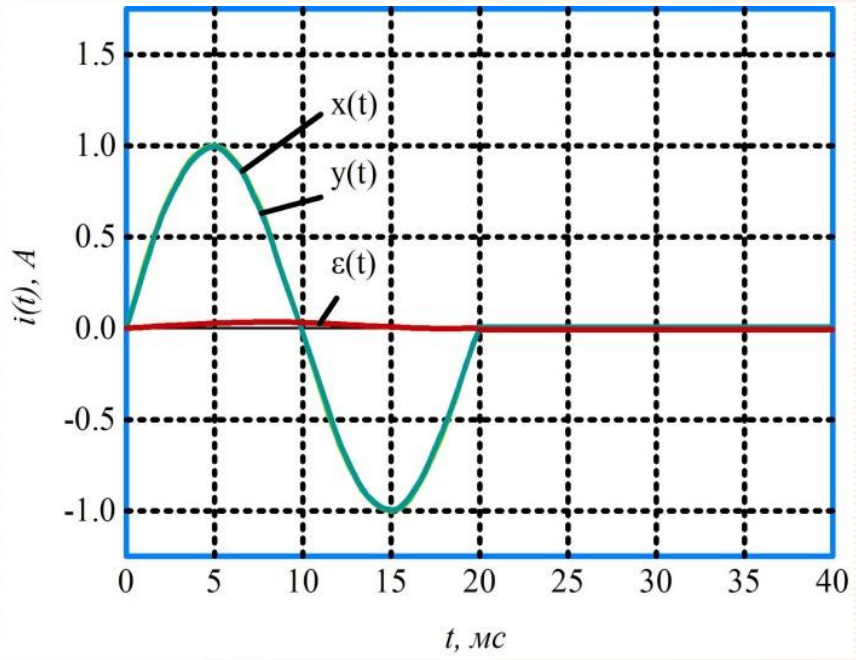
При нижней граничной частоте 40 Гц

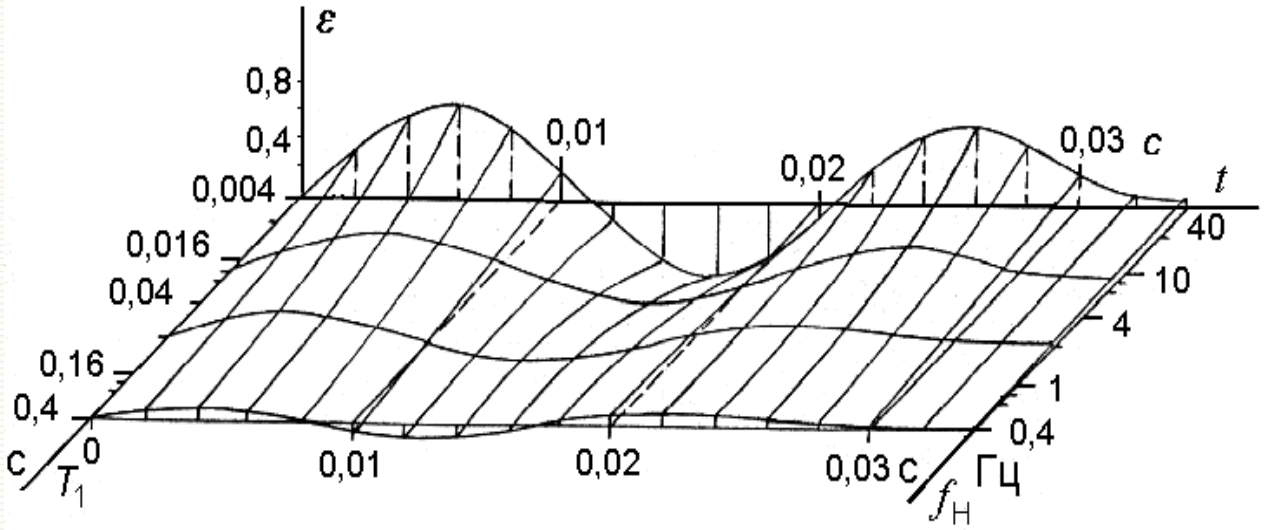


$$f_{\text{Н}} = \frac{A_{\text{Н}}}{\sqrt{1 - A_{\text{Н}}^2}} \frac{R_2}{2\pi L}$$

$$T_1 = \frac{L}{R_2}$$

При нижней граничной частоте 0,1 Гц

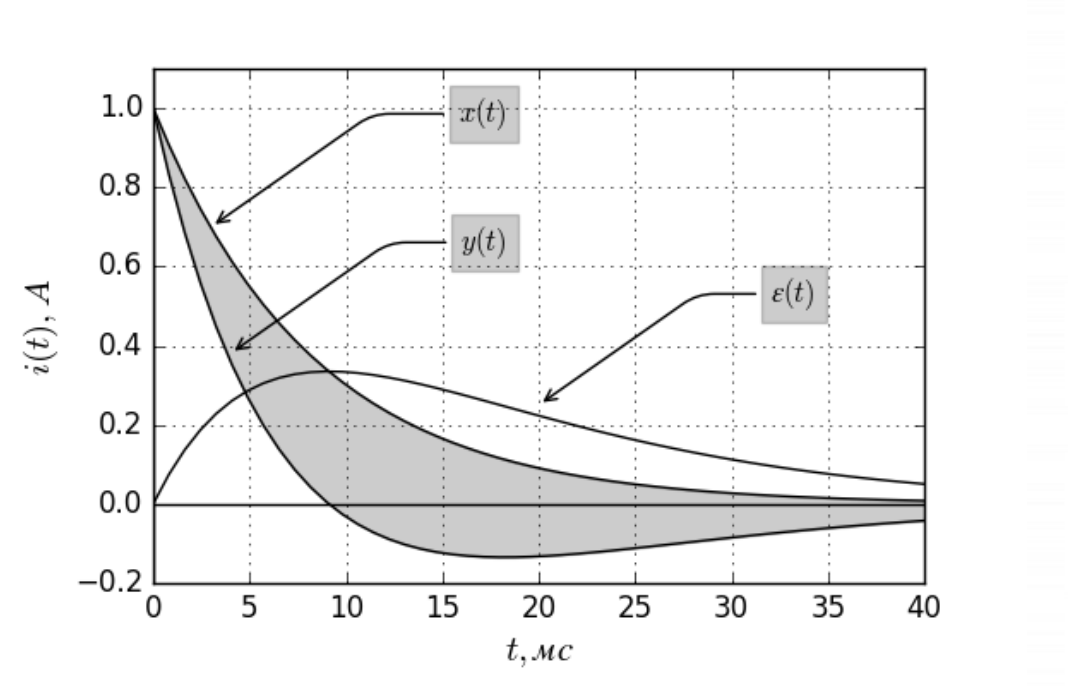




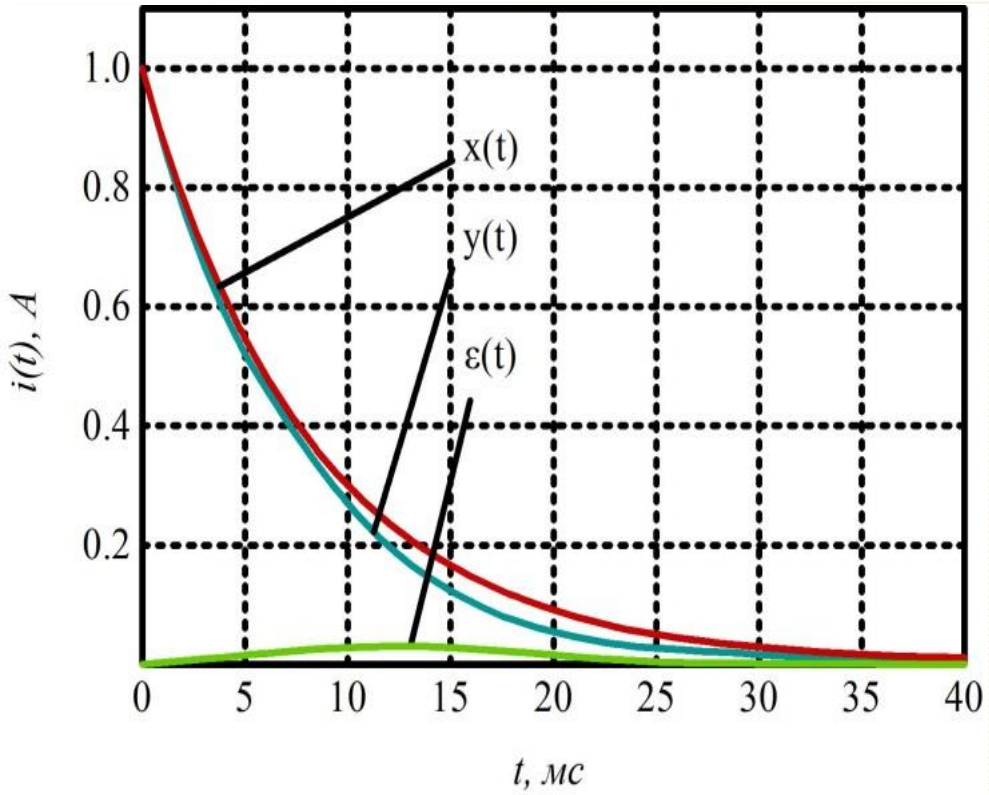
Зависимость погрешности преобразования ЭМПТ отрезка синусоидального сигнала с частотой 50 Гц длительностью 3 полупериода от постоянной T_1 (нижней граничной частоты $f_{\text{Н}}$) и текущего времени t в виде поверхности в трехмерном пространстве

Погрешности преобразования сигнала в виде отрезка экспоненты

При нижней граничной частоте 40 Гц

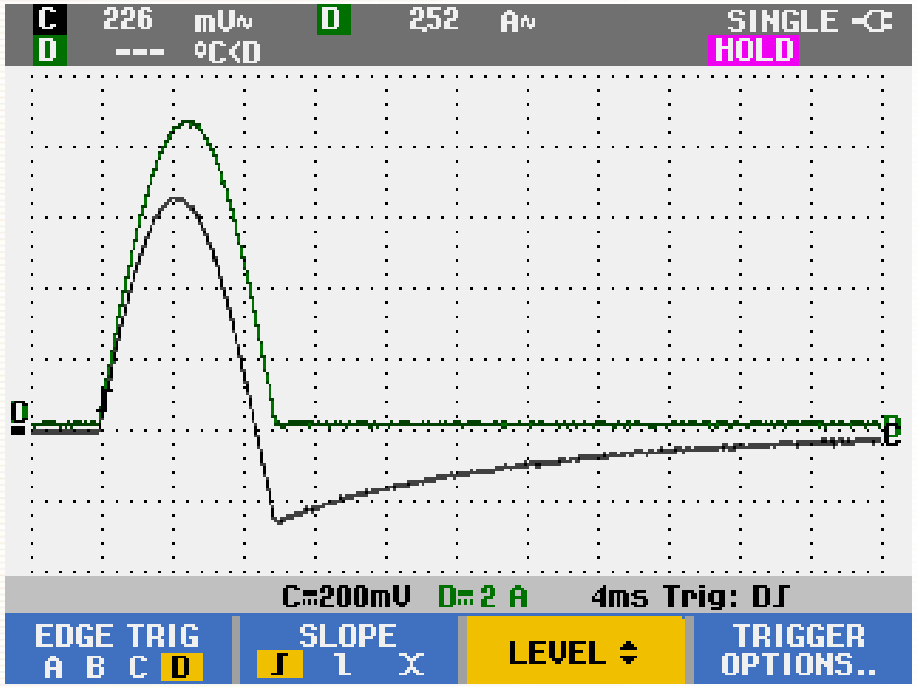


При нижней граничной частоте 0,1 Гц

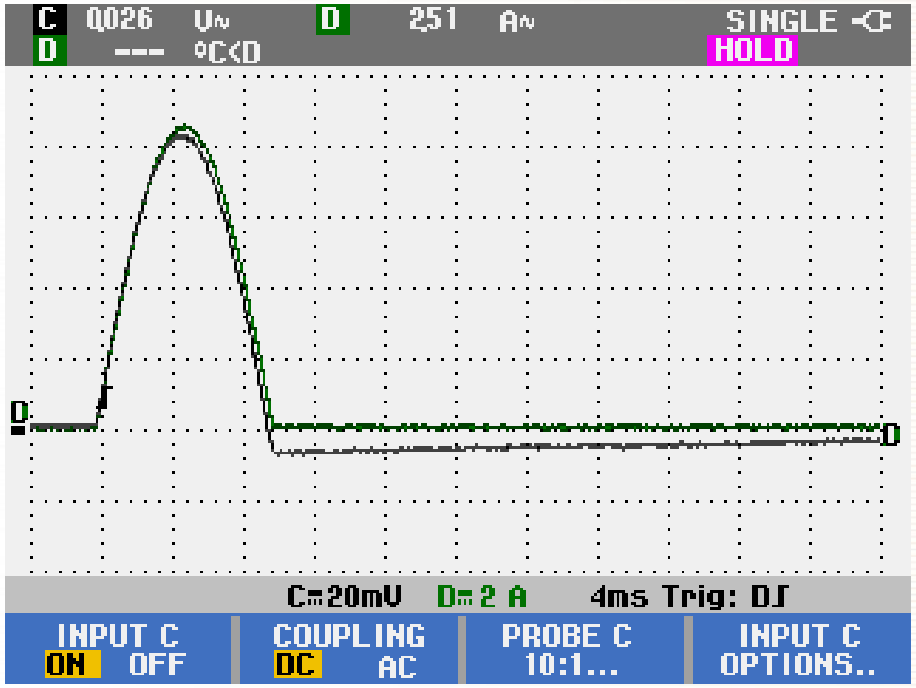


Прохождение однополярного сигнала через ЭМПТ (экспериментальные данные)

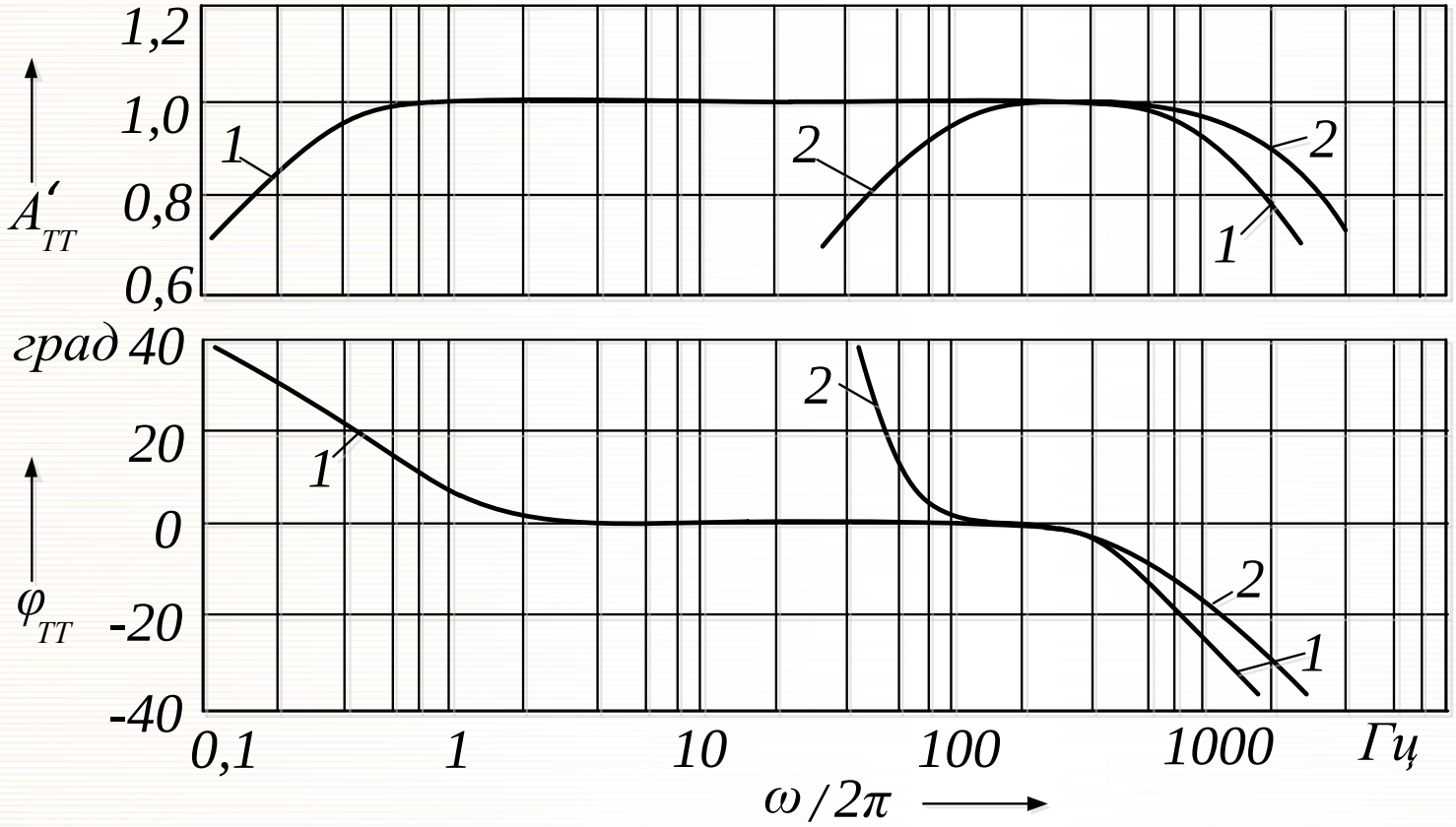
При нижней граничной частоте 40 Гц



При нижней граничной частоте 0,1 Гц



Частотные характеристикики ЭМПТ



$$f_{HT} = \frac{A_H}{\sqrt{1-A_H^2}}\frac{R_2}{2\pi L};$$

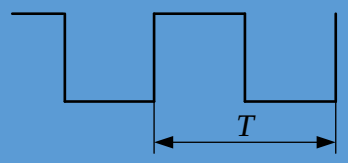
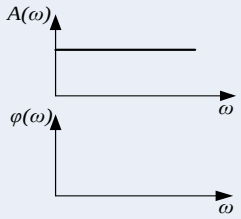
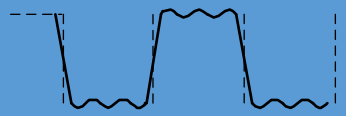
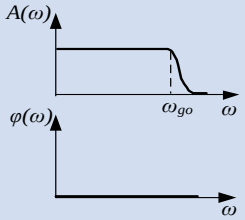
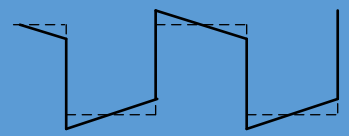
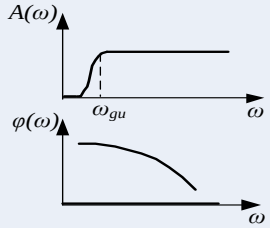
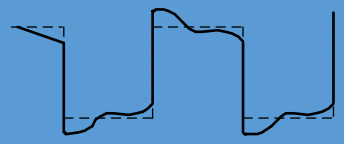
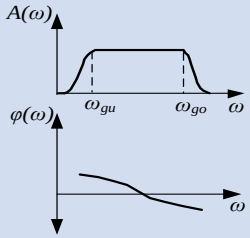
$$f_{BT} = \frac{\sqrt{1-A_B^2}}{A_B}\frac{R_П}{2\pi L_2};$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{R_2 R_П}{L_2 L}}.$$

1 - При нижней граничной частоте 0,1 Гц

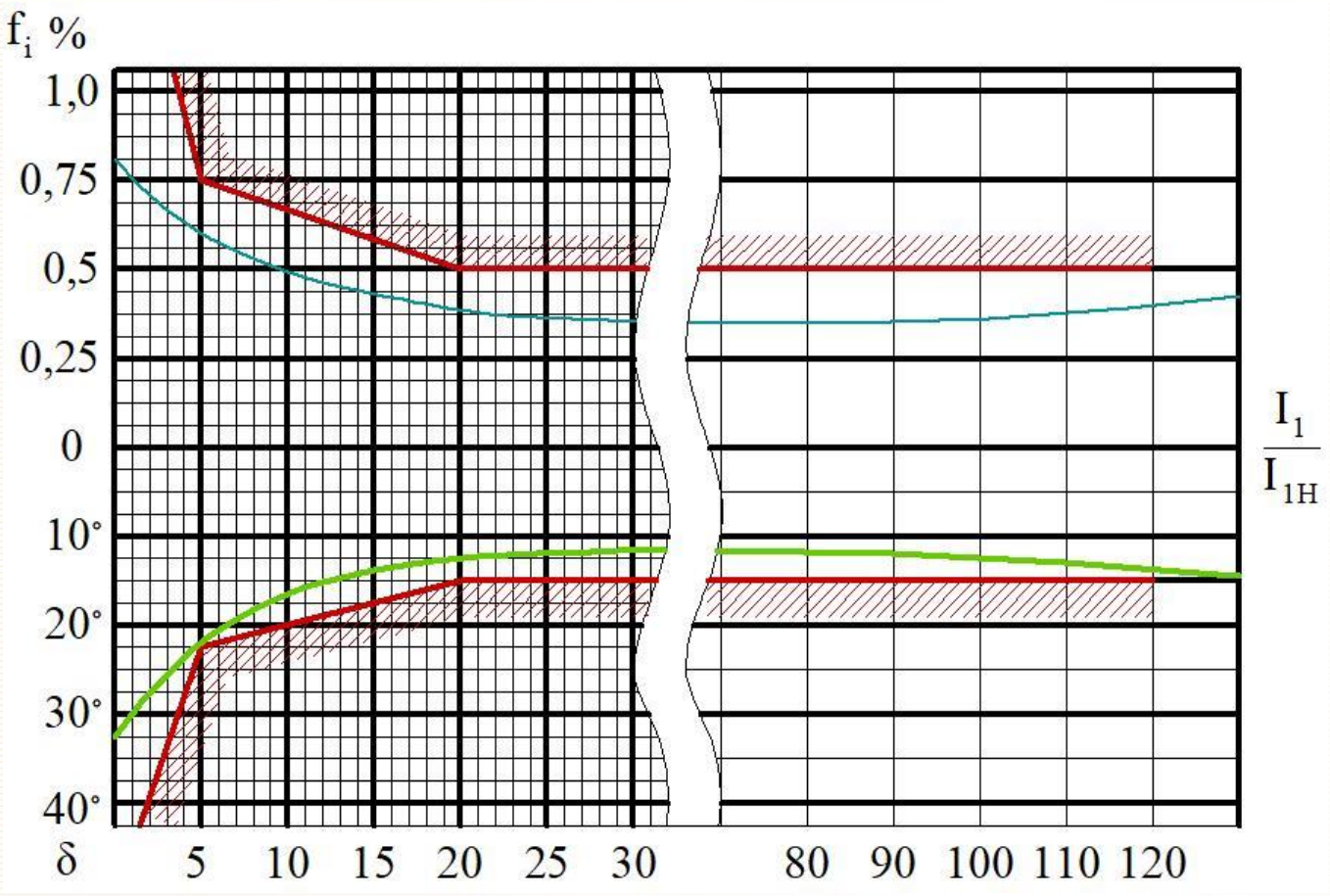
2 - При нижней граничной частоте 40 Гц

Динамические погрешности ЭМПТ

Входная величина	Измеренная выходная величина	Причина		Примечание
Форма кривой	Типичные признаки	Амплитудная и фазовая частотные характеристики $A(\omega), \varphi(\omega)$	Типичные признаки	
	Четкие углы Крутые фронты Отсутствие спада верхушки импульса		Идеальная система Идеальная фазовая характеристика	Практически трудно выполнима; лишь приближенно для высококачественных измерительных устройств
	Нечеткие углы Скошенные фронты Отсутствие спада верхушки импульса		Слишком малая верхняя граничная частота f_{go}, нижняя граничная частота $f_{gu} = 0$	Устранение погрешности: увеличить верхнюю граничную частоту, например, уменьшив массу
	Четкие углы Крутые фронты Спад верхушки импульса		Слишком большая нижняя граничная частота f_{gu}, верхняя граничная частота $f_{go} = \infty$	Погрешность проявляется тем сильнее, чем медленнее протекает процесс. Чисто статическая градуировка и измерение невозможны (например, пьезоэлектрическое измерительное устройство)
	Нечеткие углы Скошенные фронты Спад верхушки импульса		Слишком малая верхняя и большая нижняя граничные частоты	Недостатки, короткие пики измеряются с искажением, невозможны статические измерения

Стиатические погрешности ЭМПТ (сигнал синусоидальной формы частотой 50 Гц)

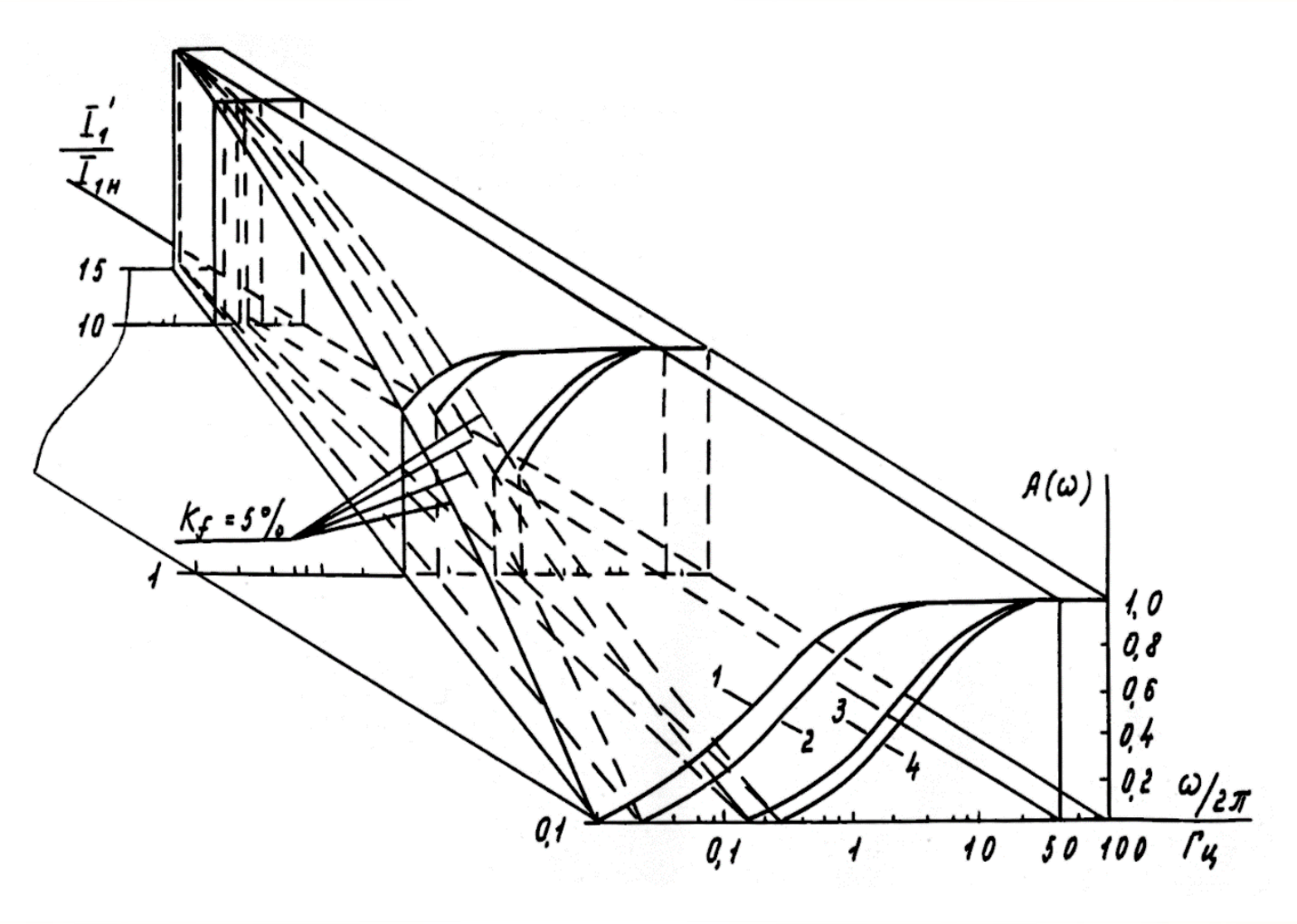
При нижней граничной частоте 0,1 Гц



f –токовая погрешность

δ – угловая погрешность

Частотные характеристики в области линейных режимов ЭМПТ



НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ БРЕСЛЕР

Отечественные нанокристаллические материалы с высокой магнитной проницаемостью

АМАГ-200С

Магнитопровод витой ленточный из нанокристаллического сплава с высокой проницаемостью MSTN-170A-TH

Индукция насыщения, B_{10} (25 °C): 1,16 Тл
Индукция насыщения, B_{10} (90 °C): 1,10 Тл
Температура Кюри, T_C: 560 °C
Диапазон температур: от - 60 до +155°C
Температура начала кристаллизации: 515 °C
Плотность: 7,3 ± 0,1 г/см^3
Магнитострикция насыщения, не более: 0,5x10^{-6}

Наименование параметра	Нормируемое значение по КВШУ.684459.090ТУ
Коэффициент индуктивности A_L^* (мкГн/вит^2), не менее (При f=100 кГц, I × w = 20 мА×вит)	24,8
Магнитная проницаемость материала сердечника, не менее (При f=100 кГц, I × w = 20 мА×вит)	20000
Типичное значение	30000
Коэффициент прямоугольности Br/Bm, не более (При f=1 кГц, Hm = 80 А/м)	0,35
Удельные потери Pcm (Вт/кг), не более (При f=100 кГц, Bm = 0.3 Тл)	90
Типичное значение	60

НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ БРЕСЛЕР

Заключение

1. Для вновь создаваемой релейной защиты нового поколения необходимы первичные преобразователи тока и напряжения, обеспечивающие неискажающую передачу сигналов релейной защиты.

2. Динамический диапазон линейной работы преобразователей тока и неискажающего преобразования первичного тока для релейной защиты должен составлять не менее 400. Этот диапазон линейного преобразования может быть реализованы на основе кольцевых электромагнитных преобразователях с неразрезными сердечниками.

3. По предварительным (приближенным) оценкам для реализации новой концепции построения систем релейной защиты в идеале необходимо иметь первичные преобразователи тока с рабочим частотным диапазоном от 0 до 1000 Гц. Причем, предельно допустимые погрешности (искажения) преобразования на границах частотного диапазона и допустимая степень искажения сигналов в переходных режимах должны быть определены путем углубленного строгого научного обоснования.

4. Исследовано влияние частотных характеристик ЭМПТ на точность их работы. Установлено, что погрешности связаны с параметрами ЭМПТ экспоненциальными функциями, убывающими при снижении нижней граничной частоты ЭМПТ. Показано, что ЭМПТ с нижней граничной частотой полосы пропускания менее 0,1 Гц, как правило, имеют достаточно хорошие метрологические показатели. Характеристики ЭМПТ с нижней граничной частотой более 10 Гц не удовлетворяют требованиям современных систем защиты по неискажающей передаче сигналов, и требуется улучшение их характеристик.

5. Показано, что сужение полосы пропускания первичные преобразователей тока (особенно в области нижних частот) приводит к искажениям выходного сигнала в переходных режимах в наиболее ответственных ситуациях при передаче характерных для релейной защиты сигналов. Это служит весомым обоснованием необходимости расширения рабочего частотного диапазона первичных преобразователей в область нижних частот.