инженерный центр энергосервис

РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ СВИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ, АВТОМАТИКИ, МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ

Мокеев А.В., Ульянов Д.Н., Пискунов С.А.
ООО «Инженерный центр «Энергосервис»,
Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова

«МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ БОЛЬШИХ СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИКИ»
97-е заседание семинара
***Новосибирск*, 6-12 июля 2025 г.**

МЕТОДЫ АНАЛИЗА СИНХРОВЕКТОРОВ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

№	Метод анализа	Применение
1	На основе преобразования дифференциальных уравнений	1. Исследование синхровекторов тока и напряжения электромеханических и электромагнитных переходных процессов. 2. Разработка алгоритмов для систем управления, мониторинга, релейной защиты и автоматики.
2	На основе преобразования интеграла свертки	Исследование синхровекторов тока и напряжения электромеханических и электромагнитных переходных процессов.
3	Метод с использованием расширенных частотно-временных представлений	1. Анализ и синтез частотных фильтров для устройств с поддержкой технологии СВИ. 2. Исследование синхровекторов переходных процессов.
4	Упрощенный метод на основе расширенных частотно-временных представлений	1. Анализ и синтез частотных фильтров. 2. Исследование синхровекторов переходных процессов. 3. Виртуальный УСВИ.

Дифференциальное уравнение линии

$$\Delta u(t) = R_л i(t) + L_л \frac{di(t)}{dt}$$

Метод комплексных амплитуд

$$\Delta u(t) \to \Delta \dot{U} e^{j\omega_0 t},\ i(t) \to \dot{I} e^{j\omega_0 t}$$

$$\Delta \dot{U} = R_л \dot{I} + j\omega_0 L_л \dot{I}$$

$$\underline{z}_л = \frac{\Delta \dot{U}}{\dot{I}}$$

$$\hat{X}_{л1}(t) = \frac{\omega_0}{\omega_0 + \Delta\omega(t)} X_0(t)$$

$$\hat{R}_{л1}(t) = R_0(t) - \frac{\gamma(t)}{\omega_0 + \Delta\omega(t)} X_0(t)$$

$$\rho(t) = \frac{I_m'(t)}{I_m(t)} + j\varphi'(t) = \gamma(t) + j\Delta\omega(t)$$

Метод анализа для синхровекторов

$$\Delta u(t) \to \Delta \dot{U}(t) e^{j\omega_0 t},\ i(t) \to \dot{I}(t) e^{j\omega_0 t},\ \Delta \dot{U}(t) = \dot{U}_1(t) - \dot{U}_2(t)$$

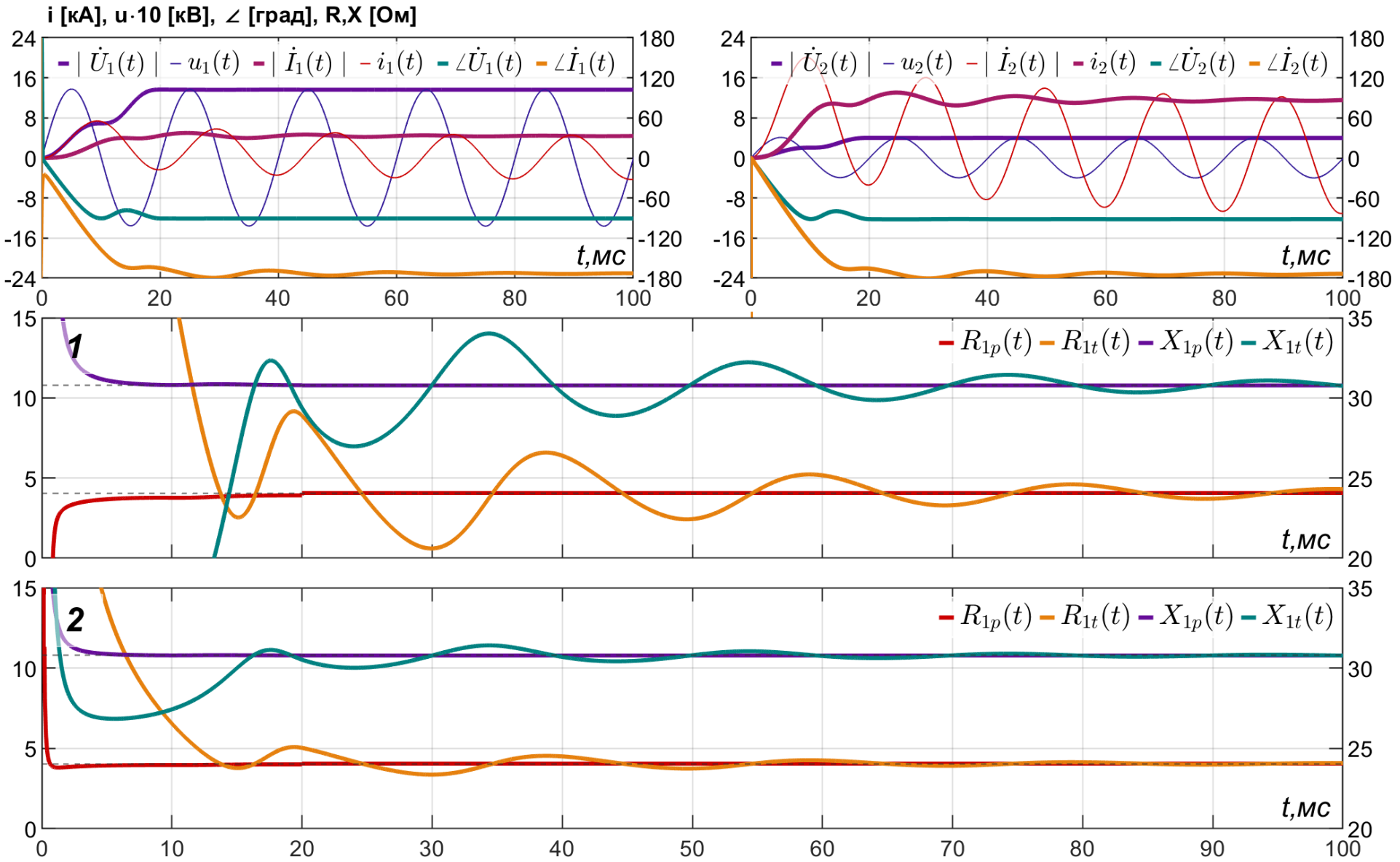
$$\Delta \dot{U}(t) = \underline{z}_л \dot{I}(t) + L_л \frac{d\dot{I}(t)}{dt}$$

$$\hat{\underline{z}}_л(t) = \frac{\Delta \dot{U}(t)}{\dot{I}(t) + \underline{k} \cdot \dot{I}'(t)} \qquad \underline{k} = \frac{L_{уд}}{\underline{z}_{уд}},\ \dot{I}'(t) = \frac{d\dot{I}(t)}{dt}$$

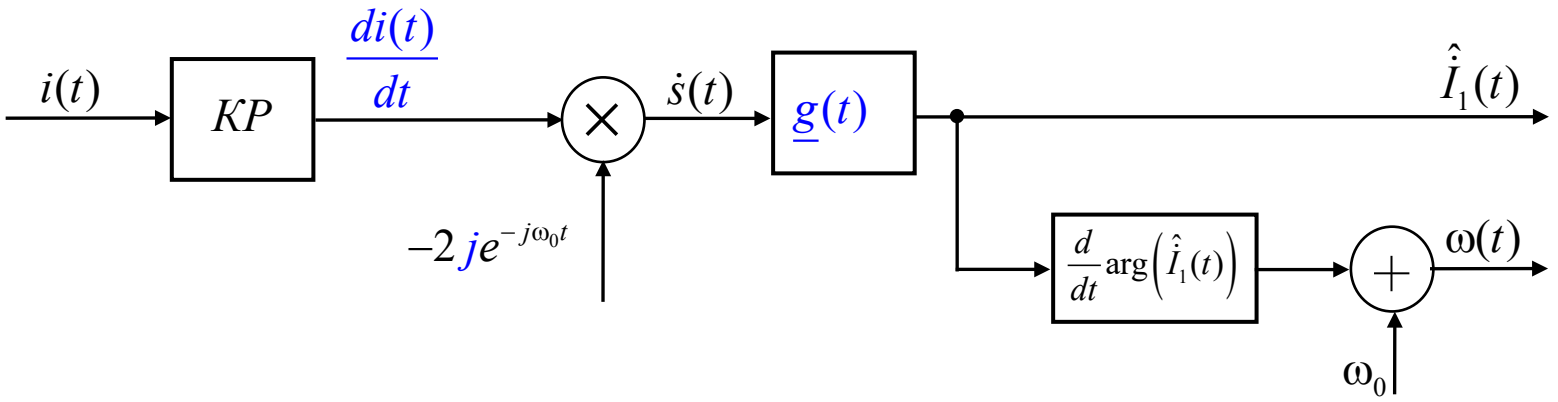
$$\hat{\underline{z}}_л(t) = \frac{\Delta \dot{U}(t)}{\dot{I}(t)} \frac{1}{1 + \underline{k} \cdot \frac{\dot{I}'(t)}{\dot{I}(t)}} = \underline{z}_0(t) \frac{1}{1 + \underline{k} \cdot \rho(t)}$$

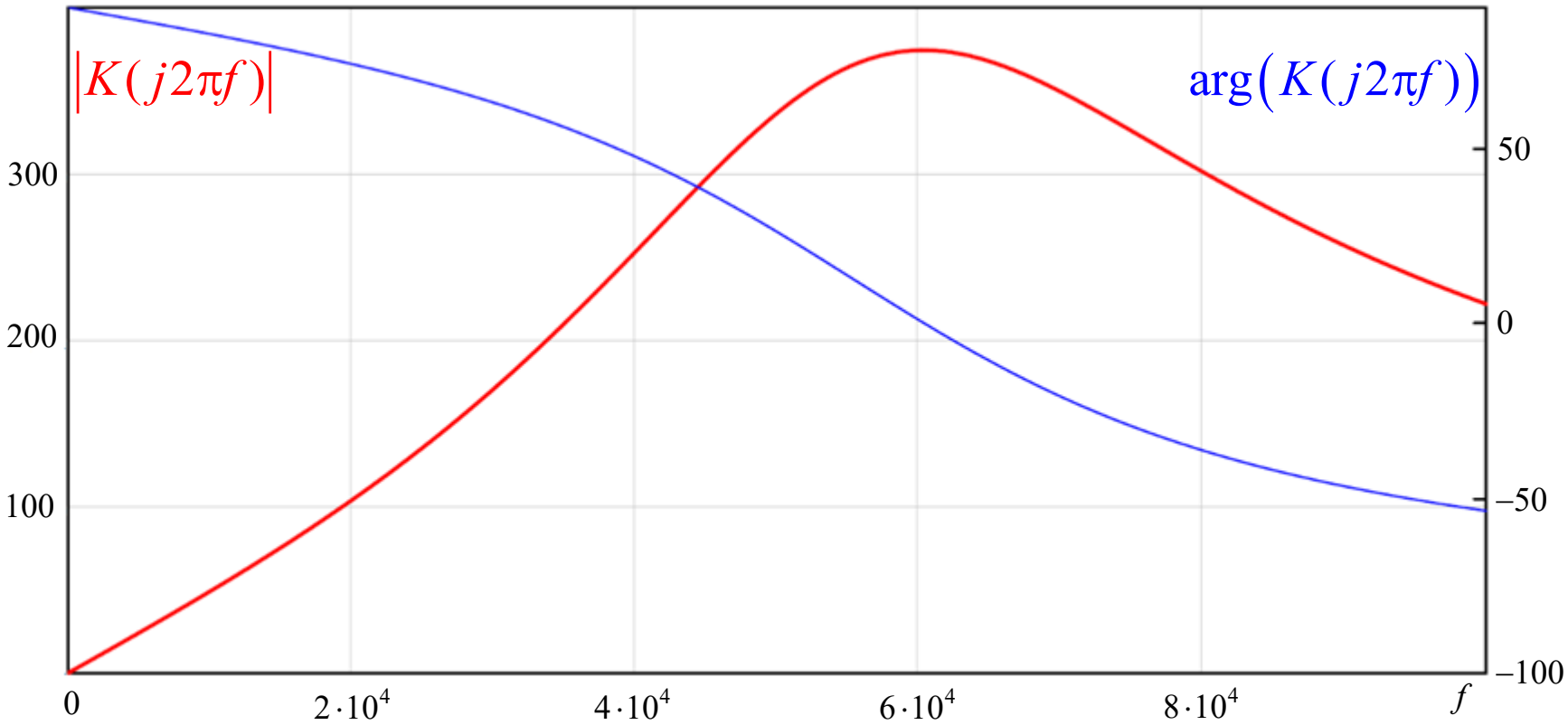
$$\underline{z}_0(t) = \frac{\Delta \dot{U}(t)}{\dot{I}(t)} = R_0(t) + jX_0(t)$$

Оценка *R*, *X* при односторонней (1) и при двухсторонней (2) оценке сопротивления

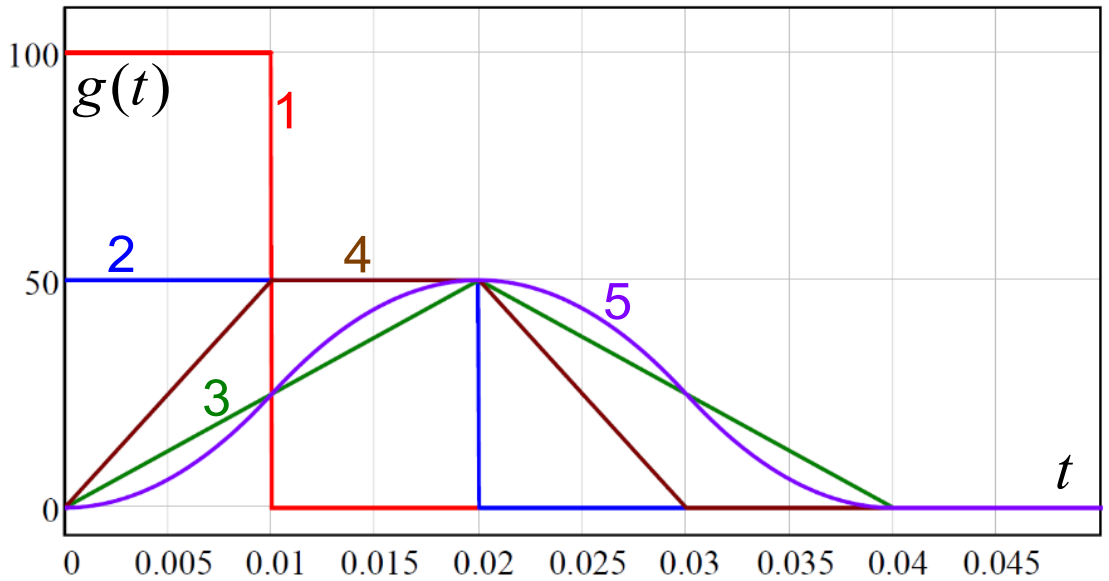


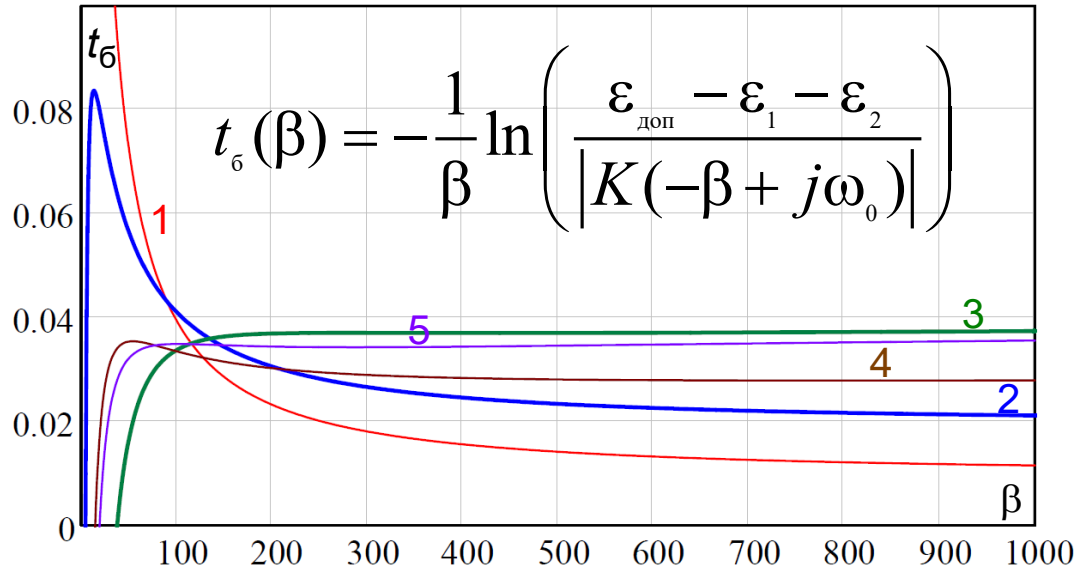
АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ДЛЯ ЦИТТ

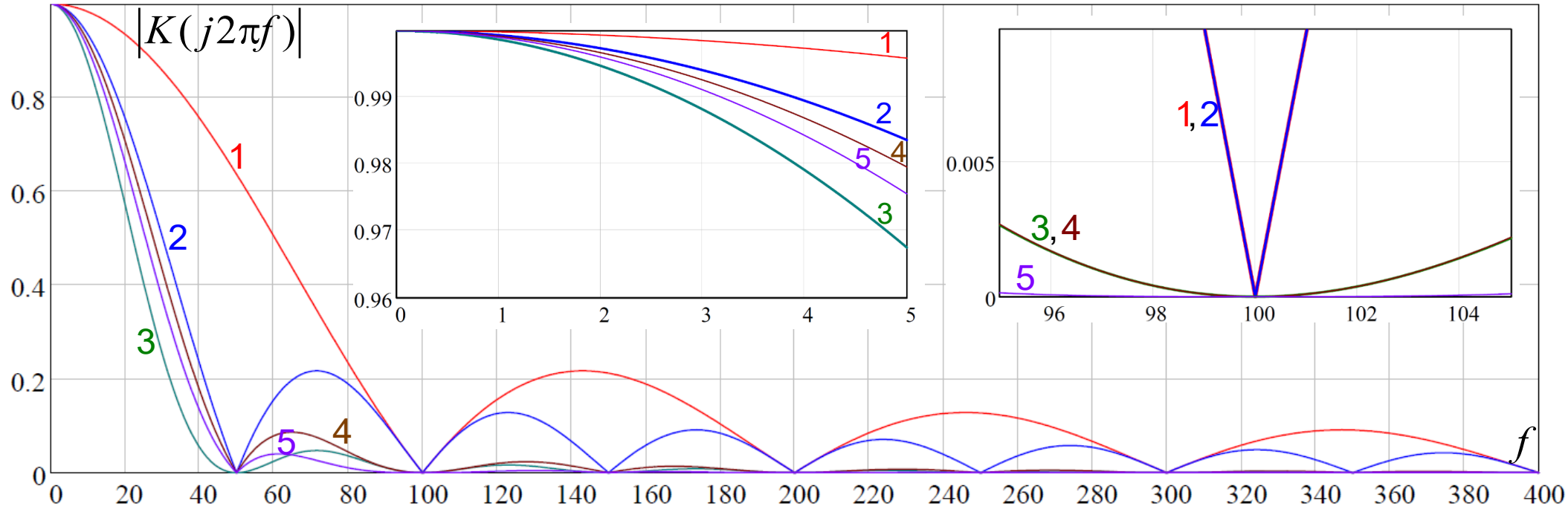




УСРЕДНЯЮЩИЕ КИХ-ФИЛЬТРЫ

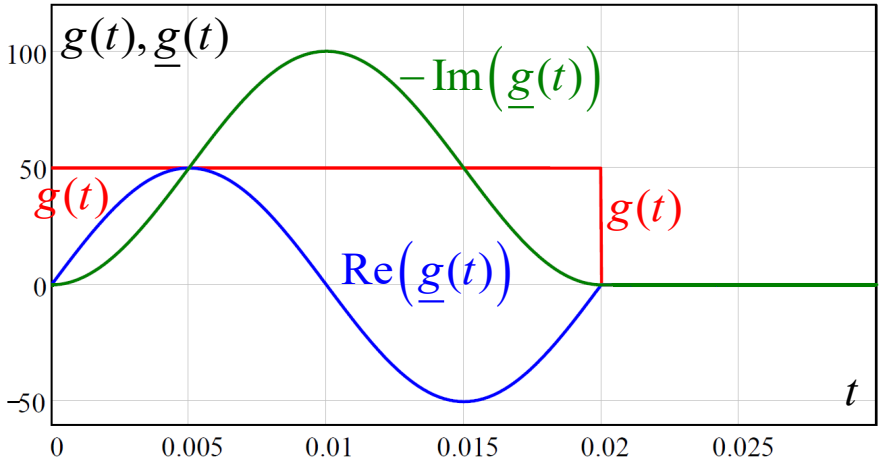


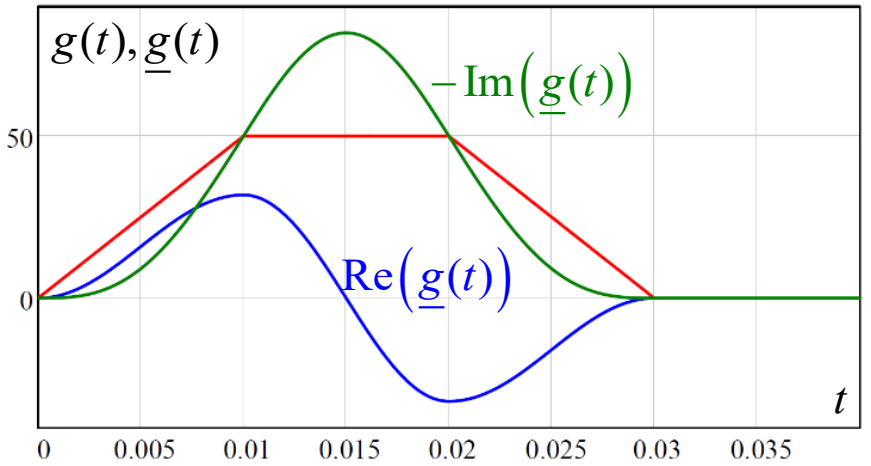


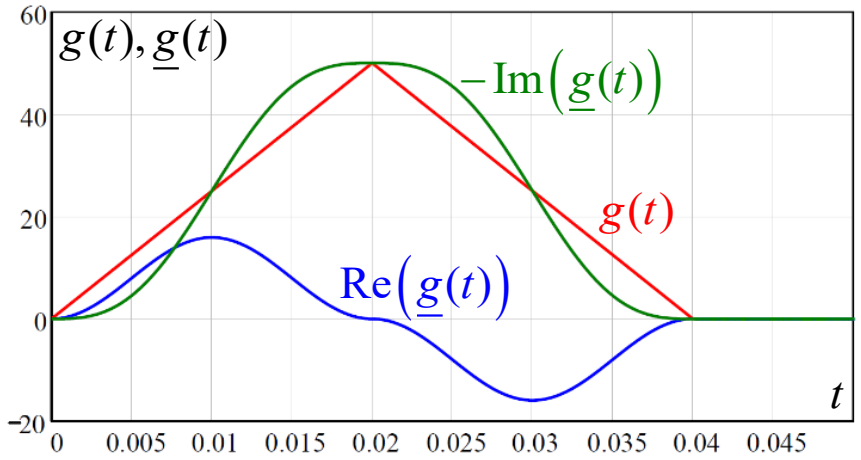


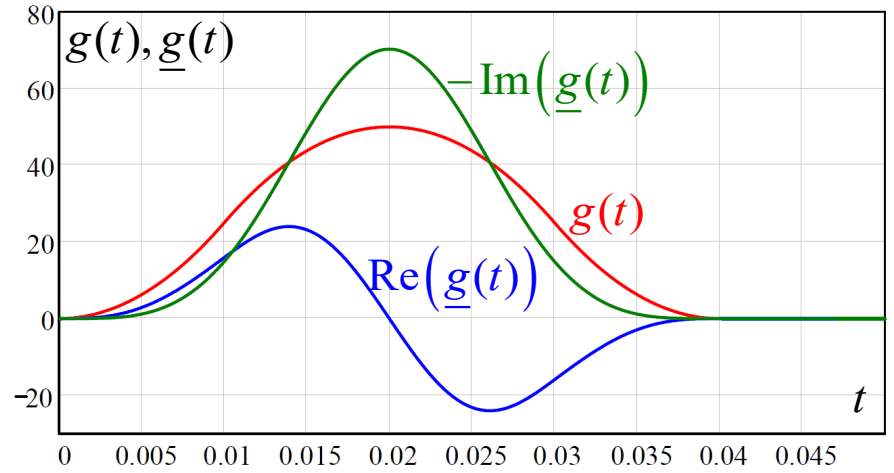
УСРЕДНЯЮЩИЕ КИХ-ФИЛЬТРЫ

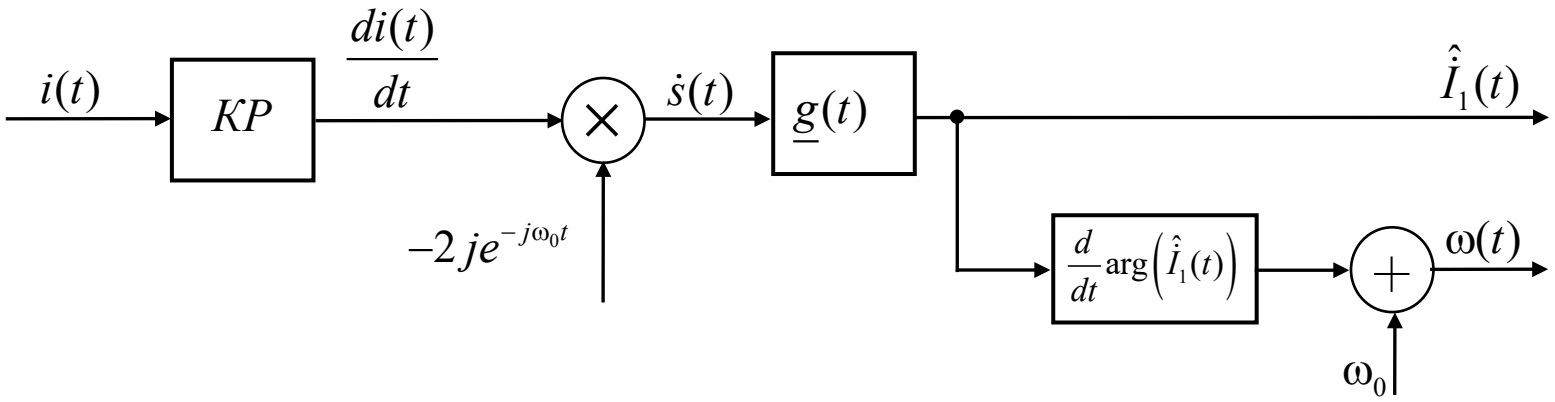
$$\frac{\omega_0}{p + j\omega_0}$$











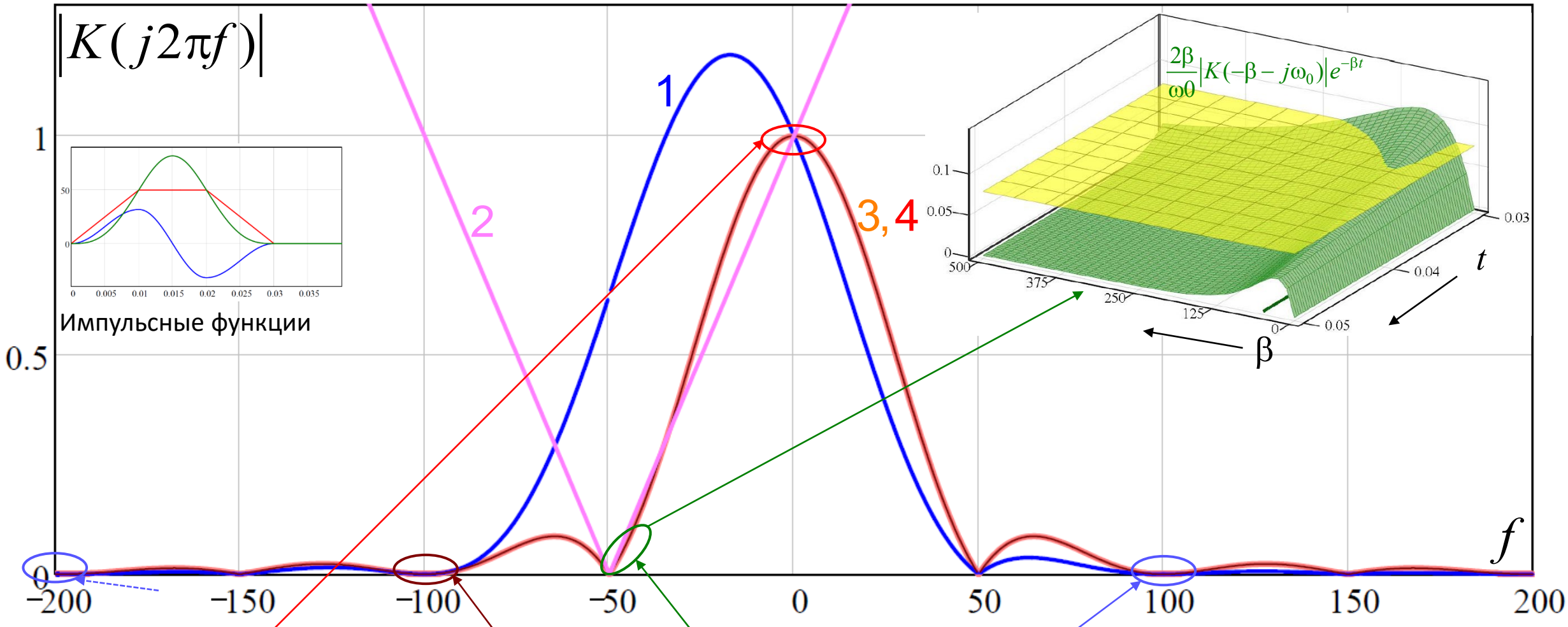
$$i(t) = I_{m1}\cos(\omega_1 t - \varphi_1) - I_0 e^{-\beta t} + I_{m3}\cos(\omega_3 t - \varphi_3)$$

$$i(t) = 0,5\dot{I}_1 e^{j\omega_1 t} + 0,5\overline{I}_1 e^{-j\omega_1 t} - I_0 e^{-\beta t} + 0,5\dot{I}_3 e^{j3\omega_1 t} + 0,5\overline{I}_3 e^{-j3\omega_1 t}$$

$$i_r(t) = \frac{1}{\omega_0}\frac{di(t)}{dt} = 0,5j\frac{\omega_1}{\omega_0}\dot{I}_1 e^{j\omega_1 t} - j\frac{\omega_1}{\omega_0}0,5\overline{I}_1 e^{-j\omega_1 t} + \frac{\beta}{\omega_0}I_0 e^{-\beta t} + 0,5j\frac{3\omega_1}{\omega_0}\dot{I}_3 e^{j3\omega_1 t} - 0,5j\frac{3\omega_1}{\omega_0}\overline{I}_3 e^{-j3\omega_1 t}$$

$$\dot{s}(t) = \dot{I}_1\frac{\omega_1}{\omega_0}e^{j(\omega_1-\omega_0)t} - \overline{I}_1\frac{\omega_1}{\omega_0}e^{-j(\omega_1+\omega_0)t} - 2j\frac{\beta}{\omega_0}I_0 e^{-(\beta+j\omega_0)t} + \dot{I}_3\frac{3\omega_1}{\omega_0}e^{j(3\omega_1-\omega_0)t} - \overline{I}_3\frac{3\omega_1}{\omega_0}e^{-j(3\omega_1+\omega_0)t}$$

УСРЕДНЯЮЩИЕ КИХ-ФИЛЬТРЫ



$$\dot{s}(t) = \dot{I}_1 \frac{\omega_1}{\omega_0} e^{j(\omega_1-\omega_0)t} - \overline{I}_1 \frac{\omega_1}{\omega_0} e^{-j(\omega_1+\omega_0)t} - 2j\frac{\beta}{\omega_0} I_0 e^{-(\beta+j\omega_0)t} + \dot{I}_3 \frac{3\omega_1}{\omega_0} e^{j(3\omega_1-\omega_0)t} - \overline{I}_3 \frac{3\omega_1}{\omega_0} e^{-j(3\omega_1+\omega_0)t}$$

1 АЧХ фильтра с комплексной импульсной функцией, полученного от фильтра с трапецеидальной ИХ

2 смещенная АЧХ катушки Роговского

3 АЧХ фильтра с трапецеидальной ИХ

СИНТЕЗ УСРЕДНЯЮЩИХ КИХ-ФИЛЬТРОВ

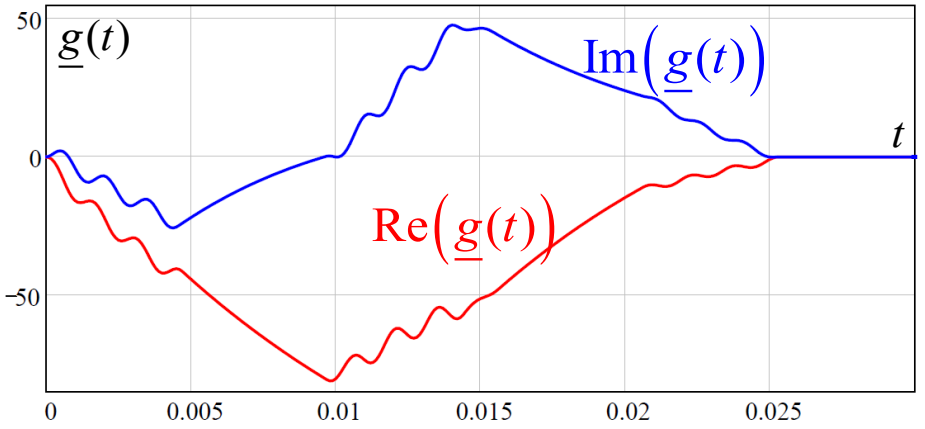
Импульсная функция фильтра с комплексными параметрами

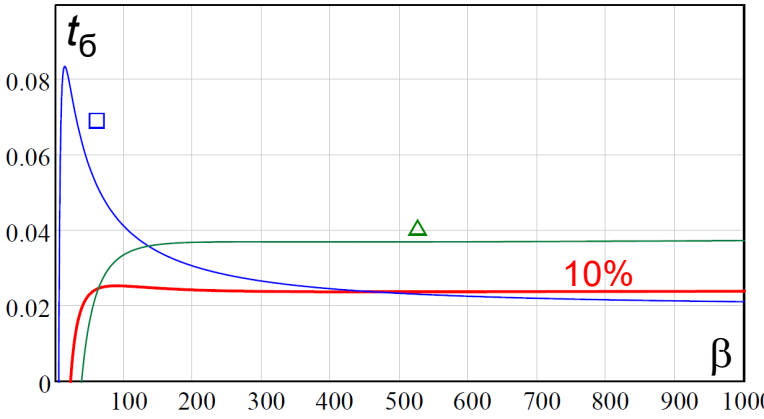
$$\underline{g}_i(t) = \dot{G}_i e^{\rho_i t} - \dot{G}_i e^{\rho_i T_i} e^{-\rho_i (t - T_i)}$$

$$\rho_i = -\alpha_i + jw_i$$

Передаточная функция фильтра

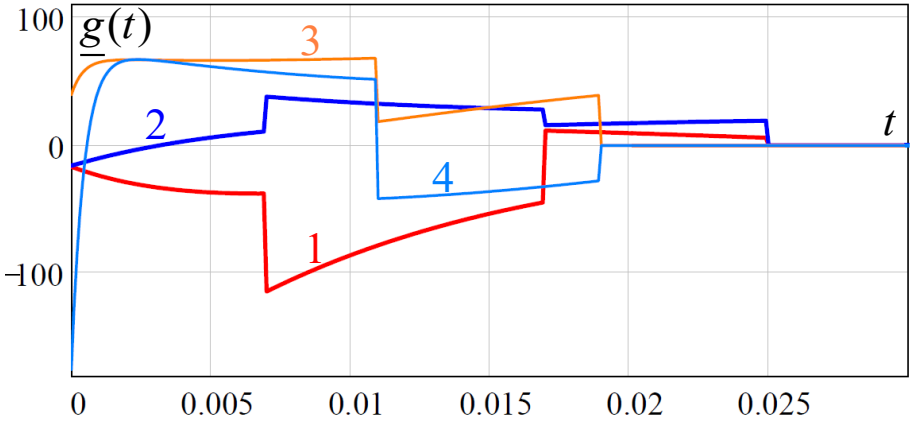
$$\underline{K}_i(p) = \frac{\dot{G}_i}{p - \rho_i}\left(1 - e^{-(p-\rho_i)T_i}\right)$$

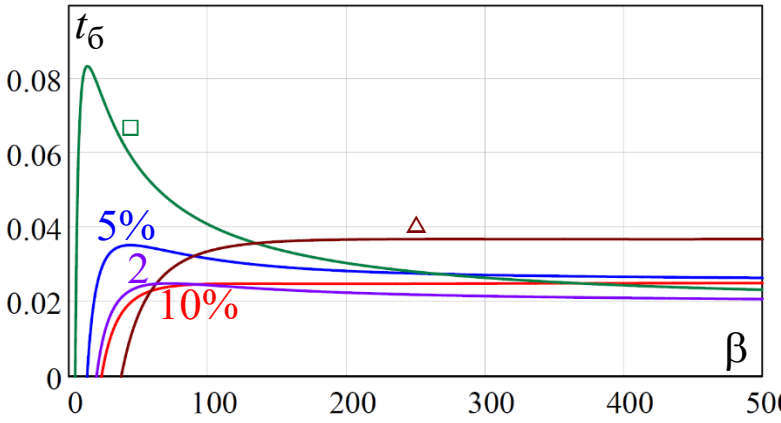




Параллельное соединение

$$\underline{K}(p) = \sum_{i=1}^{3} \underline{K}_i(p)$$





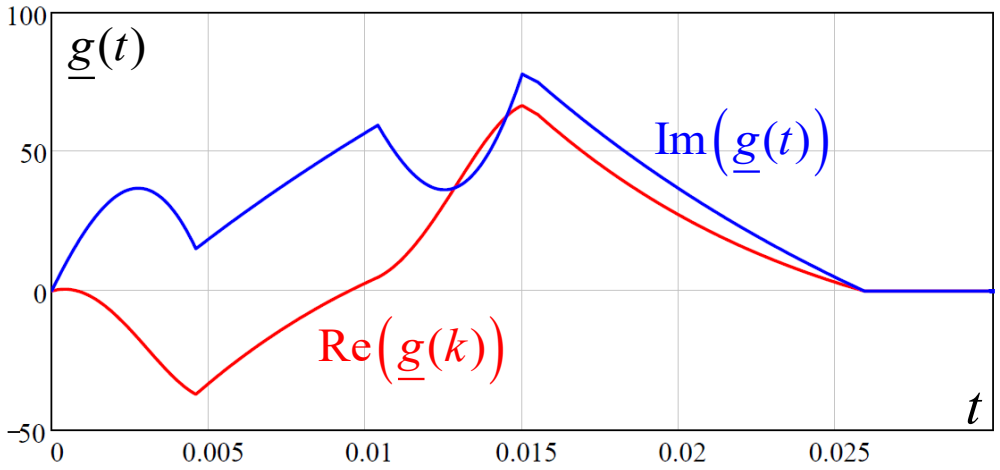
Последовательное

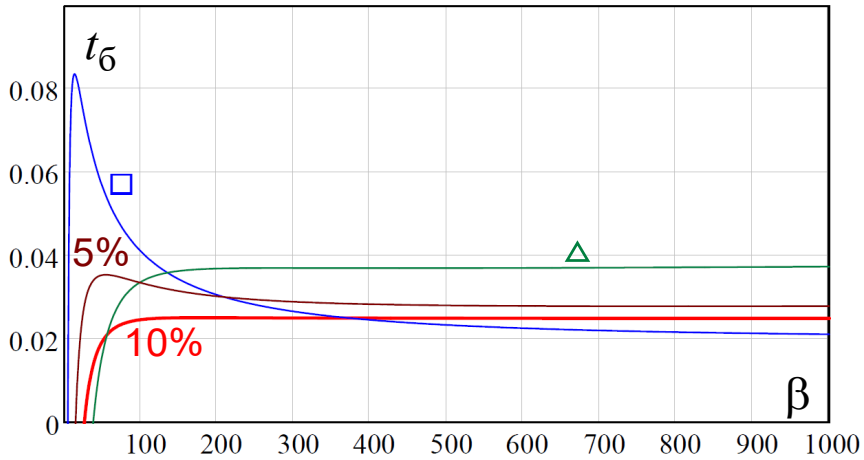
$$\underline{K}(p) = \prod_{i=1}^{3} \underline{K}_i(p)$$

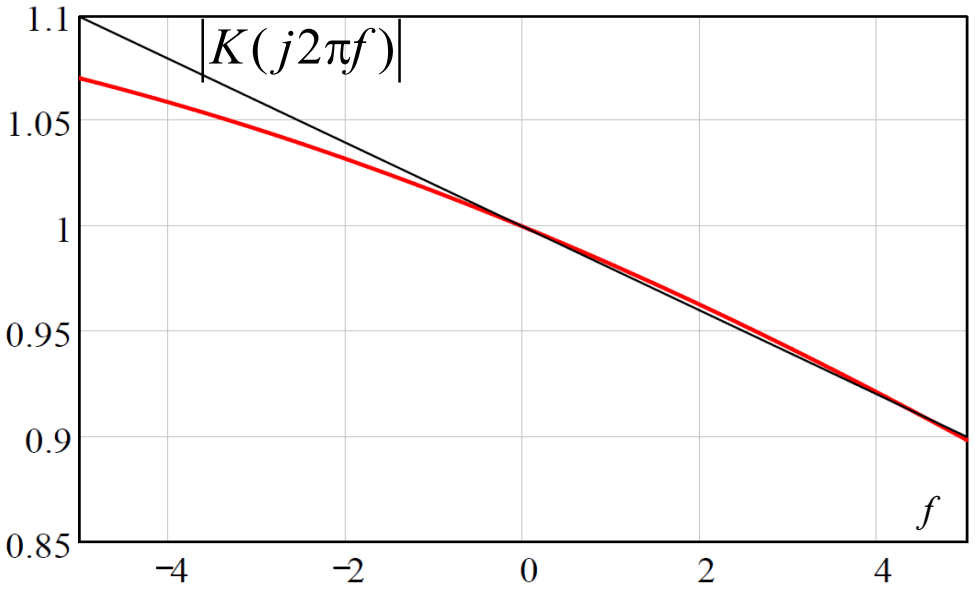
Смешанное

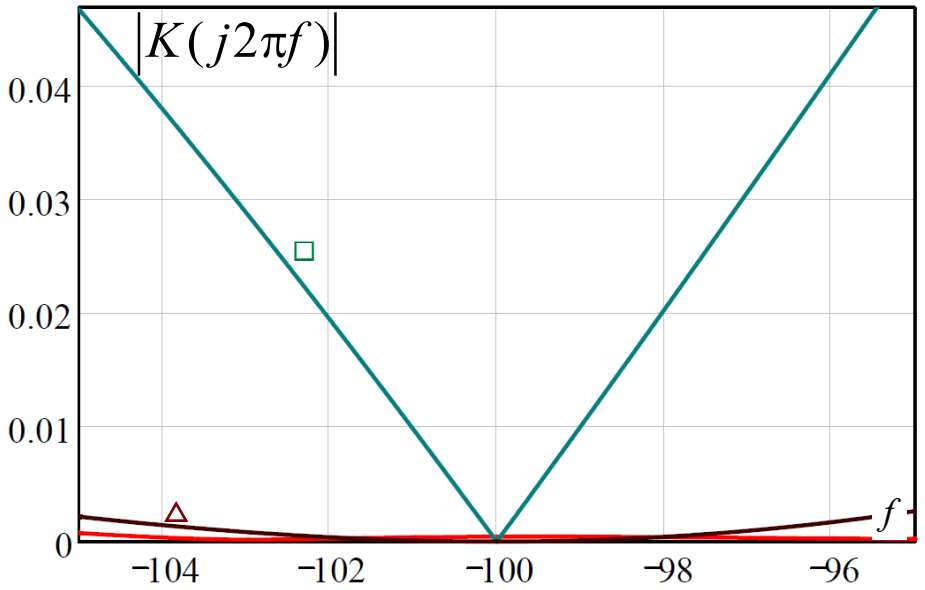
$$\underline{K}(p) = \left(\underline{K}_1(p) + \underline{K}_2(p)\right)\underline{K}_3(p)$$

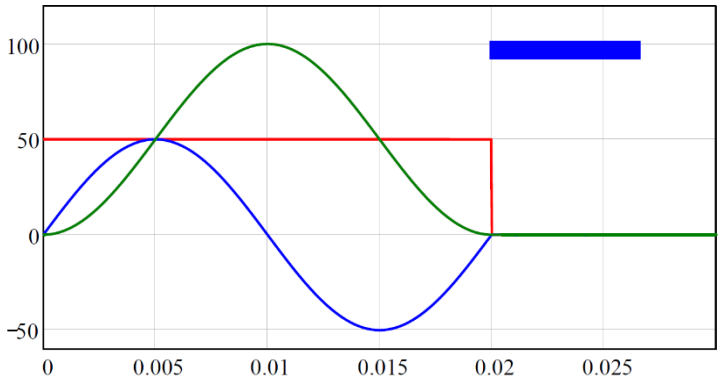
УСРЕДНЯЮЩИЕ КИХ-ФИЛЬТРЫ

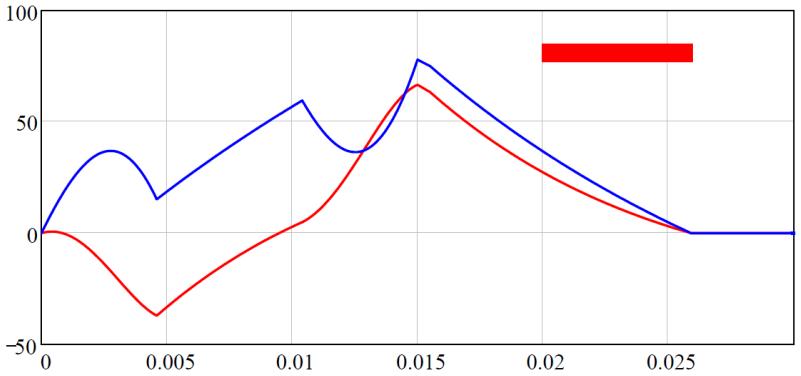






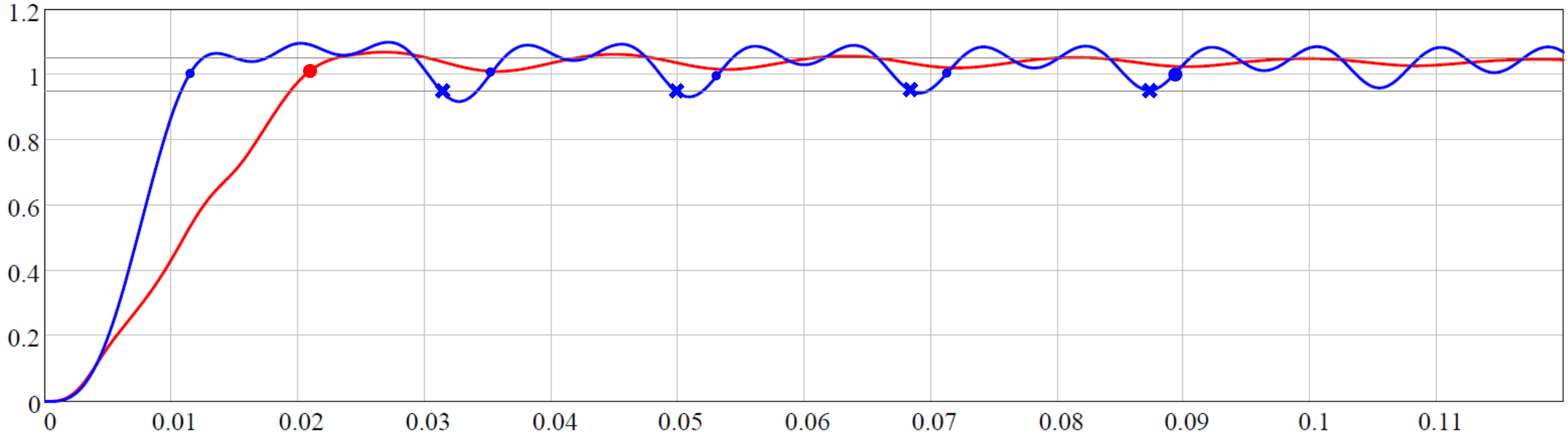






$$i(t) = I_m \cos(2\pi 55t) - I_m e^{-13,5t}$$

$$I = 1,05 I_{\text{ср}}, \quad k_{\text{в}} = 0,95$$



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Применение цифровых комбинированных трансформаторов тока и напряжения позволяет повысить надежность и эффективность систем релейной защиты и автоматики распределительных сетей.
2. Предложено использование усредняющих КИХ-фильтров с комплексной импульсной функцией для алгоритмов измерения синхровектора тока при использовании цифровых комбинированных трансформаторах катушки Роговского.
3. Приведены результаты синтеза КИХ-фильтров с комплексной импульсной функцией для устройств релейной защиты, обеспечивающие высокое быстродействие.

Благодарим за внимание!

Мокеев Алексей Владимирович
профессор Северного (Арктического) федерального университета, д.т.н.
a.mokeev@narfu.ru
зам. генерального директора ООО ”Инженерный центр ”Энергосервис”,
a.mokeev@ens.ru, http://www.enip2.ru