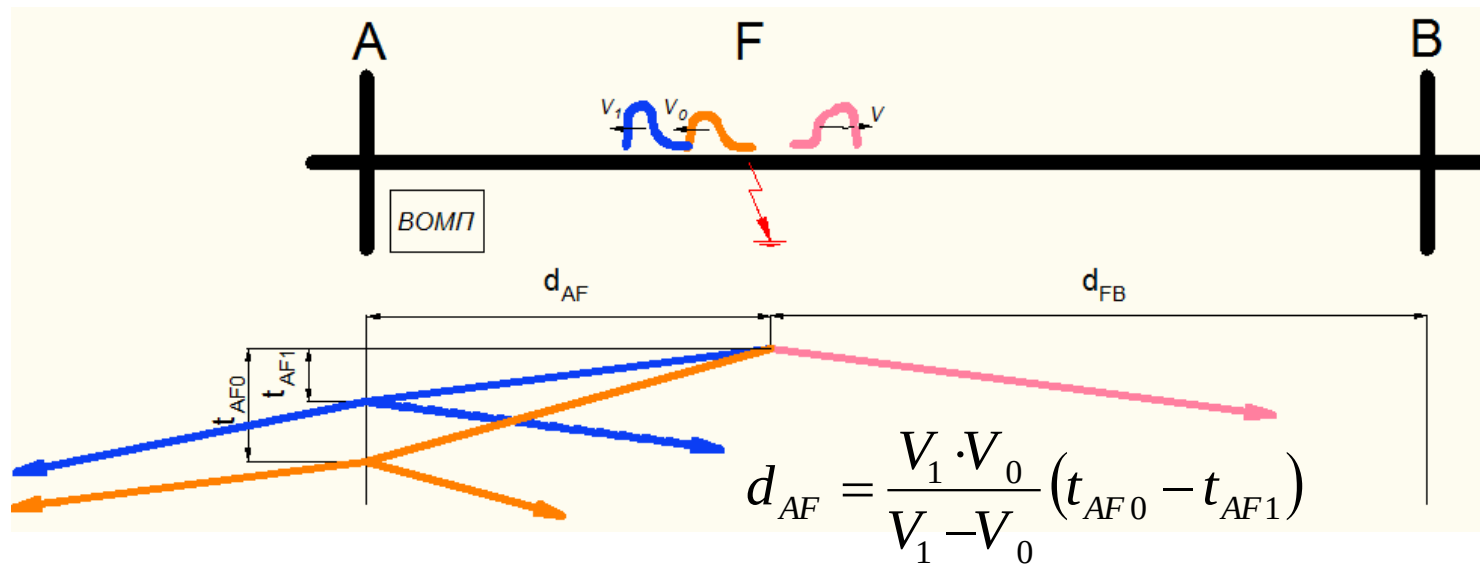
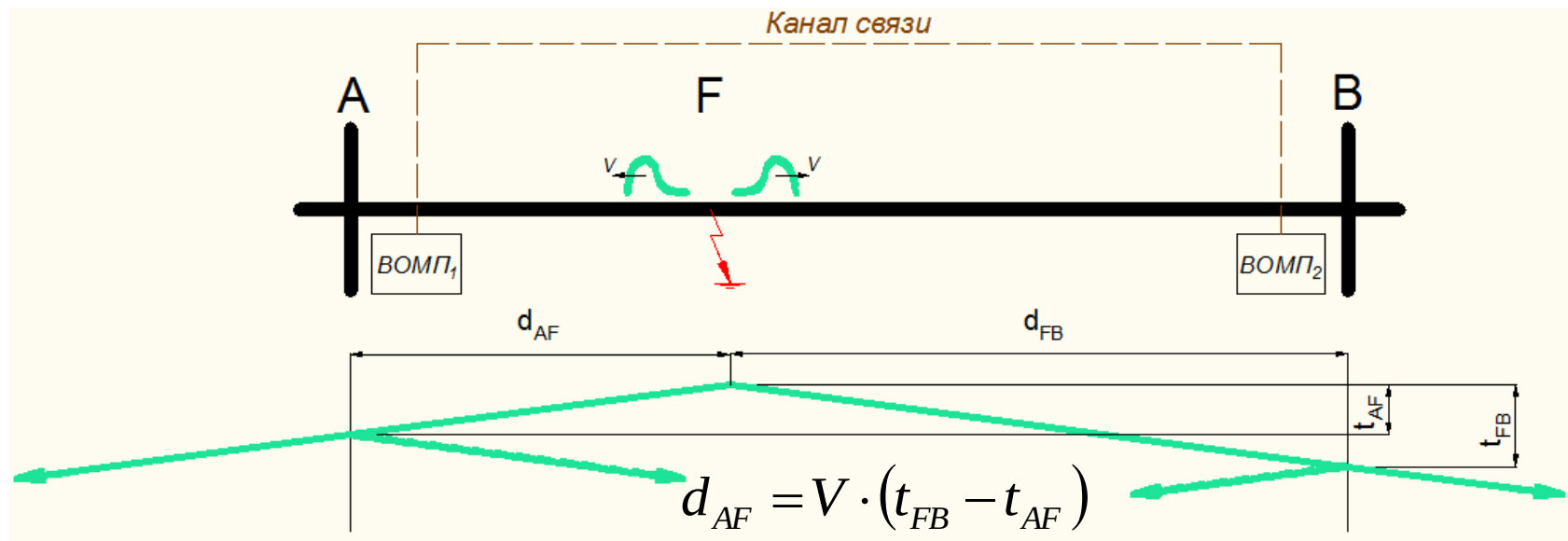
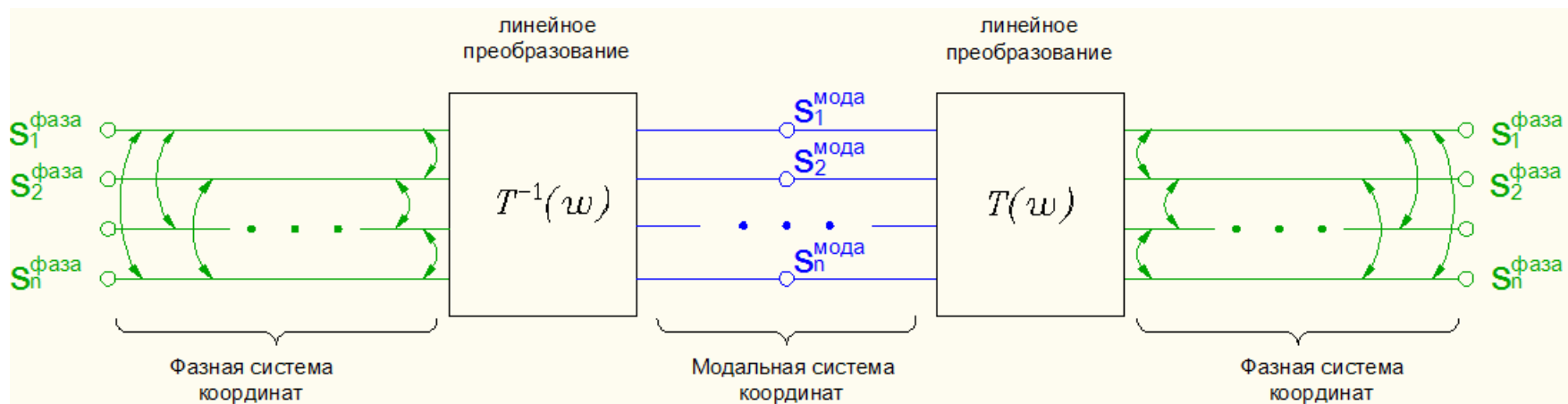


**Аппроксимация
фазо-модального преобразования
в задаче
волнового определения места
повреждения**

Токарев С.Ю.,
инженер





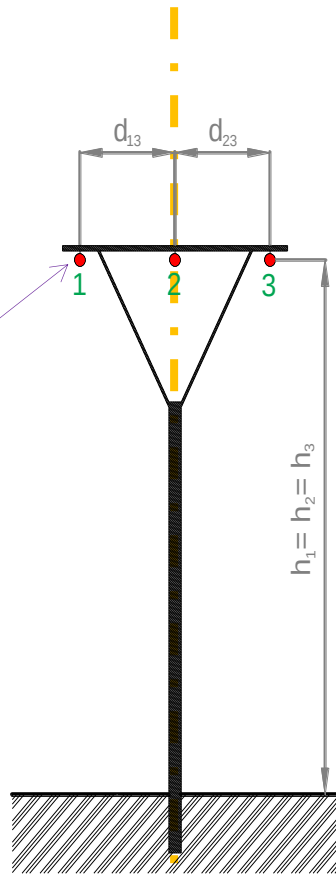
$$h_{k,p}(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \underline{T_{k,p}^{-1}(\omega)} \cdot e^{j\omega t} d\omega$$

$$s_k^{\text{мода}}(t) = \sum_{p=1}^n \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} s_p^{\text{фаза}}(\tau) \cdot h_{k,p}(t - \tau) d\tau \right\}$$

аппроксимация

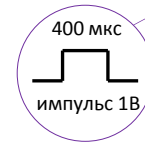
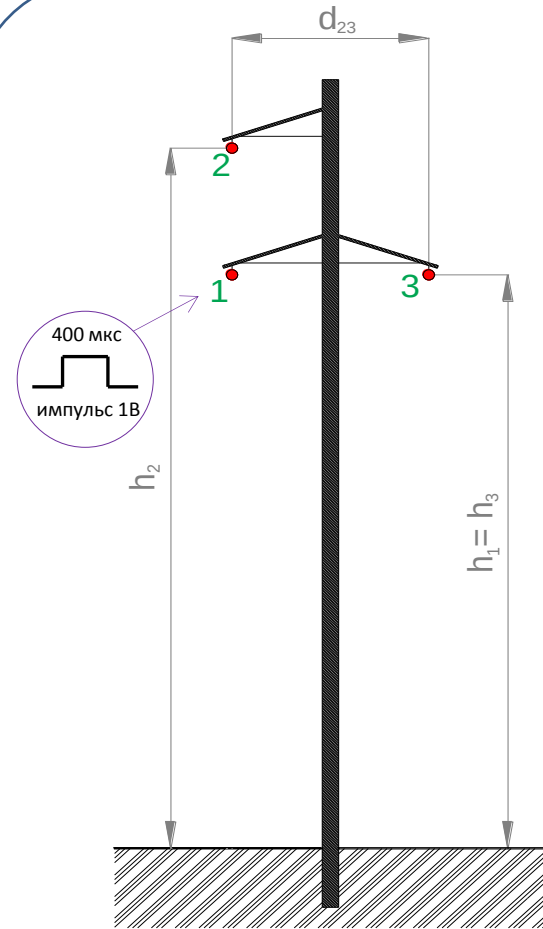
$$\forall \omega, h_{k,p}(t) = \text{Re}\{\underline{\text{const}_{k,p}}\}$$

$$s_k^{\text{мода}}(t) = \sum_{p=1}^n \left\{ s_p^{\text{фаза}}(t) \cdot h_{k,p} \right\}$$



$d_{12} = 2.3 \text{ м}$
 $d_{13} = 4.6 \text{ м}$
 $d_{23} = 2.3 \text{ м}$
 $h_1 = 10.7 \text{ м}$
 $h_2 = 10.7 \text{ м}$
 $h_3 = 10.7 \text{ м}$

Опора «ПС10П-17БМ»



$d_{12} = 0 \text{ м}$
 $d_{13} = 4.6 \text{ м}$
 $d_{23} = 4.6 \text{ м}$
 $h_1 = 14.3 \text{ м}$
 $h_2 = 18.9 \text{ м}$
 $h_3 = 14.3 \text{ м}$

Опора «ПС35/110ПУ-2.110»

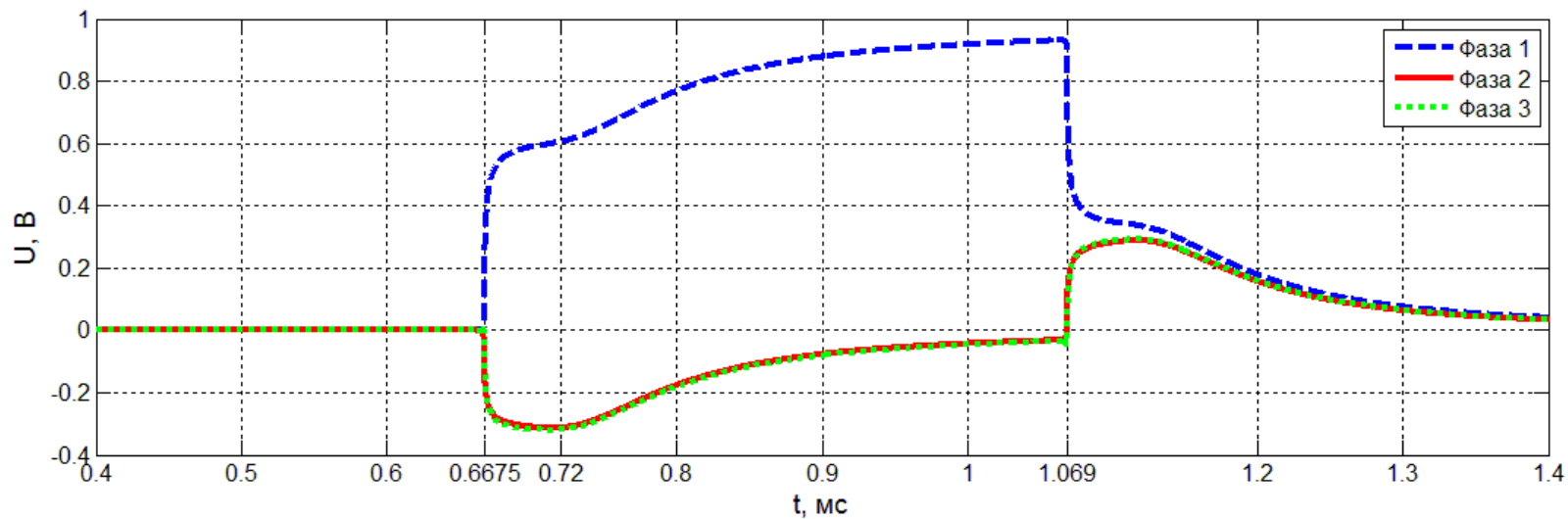
Провод «АС-185/24»

$$\sigma_{\text{земли}} = 0.01 \frac{\text{См}}{\text{м}}$$

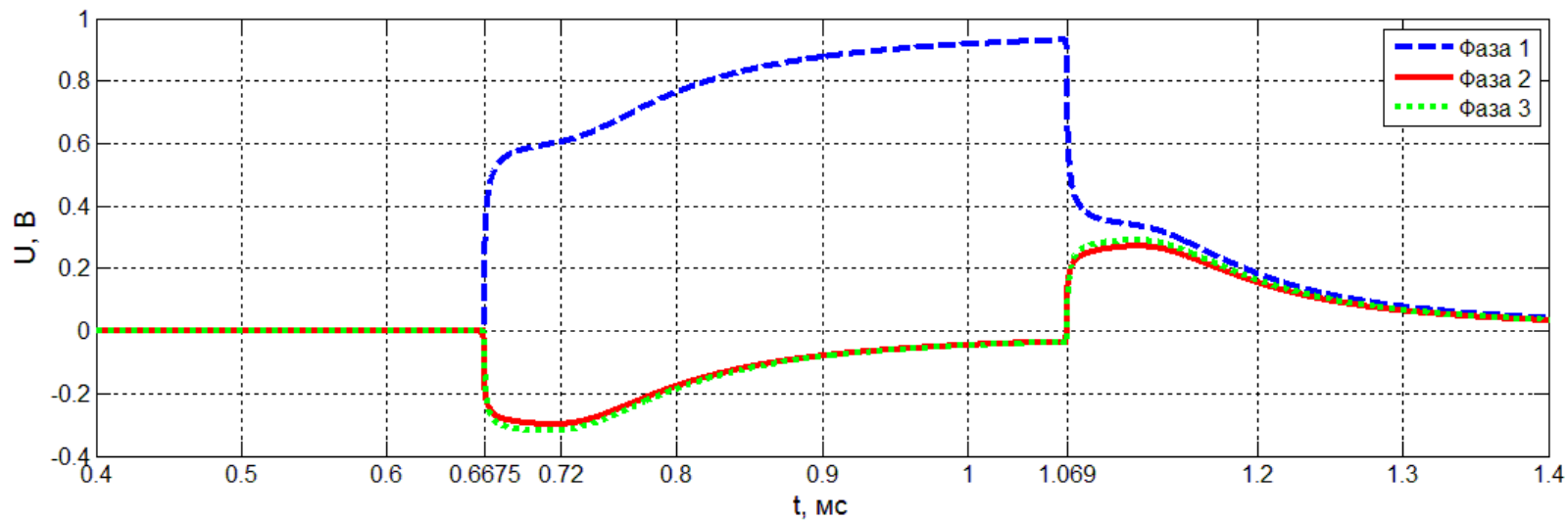
$$\varepsilon_{\text{земли}} = 10$$

Фазная система координат

$L = 200 \text{ км}$

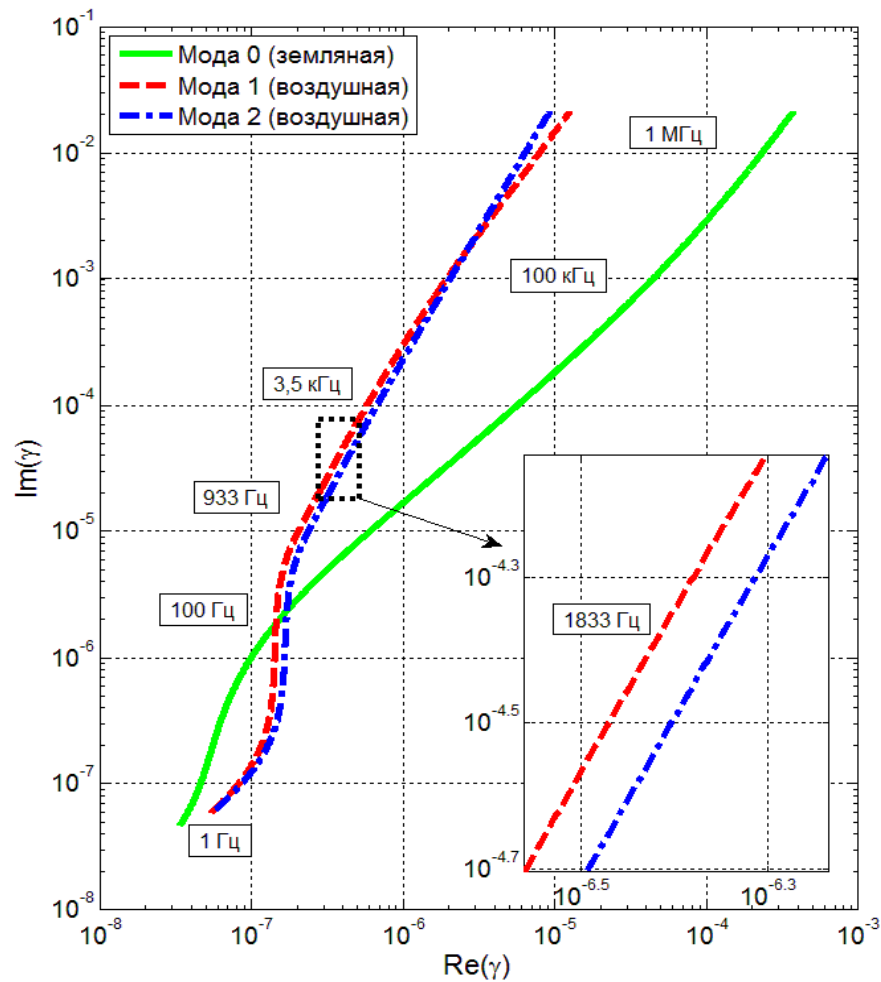


Симметричная
линия

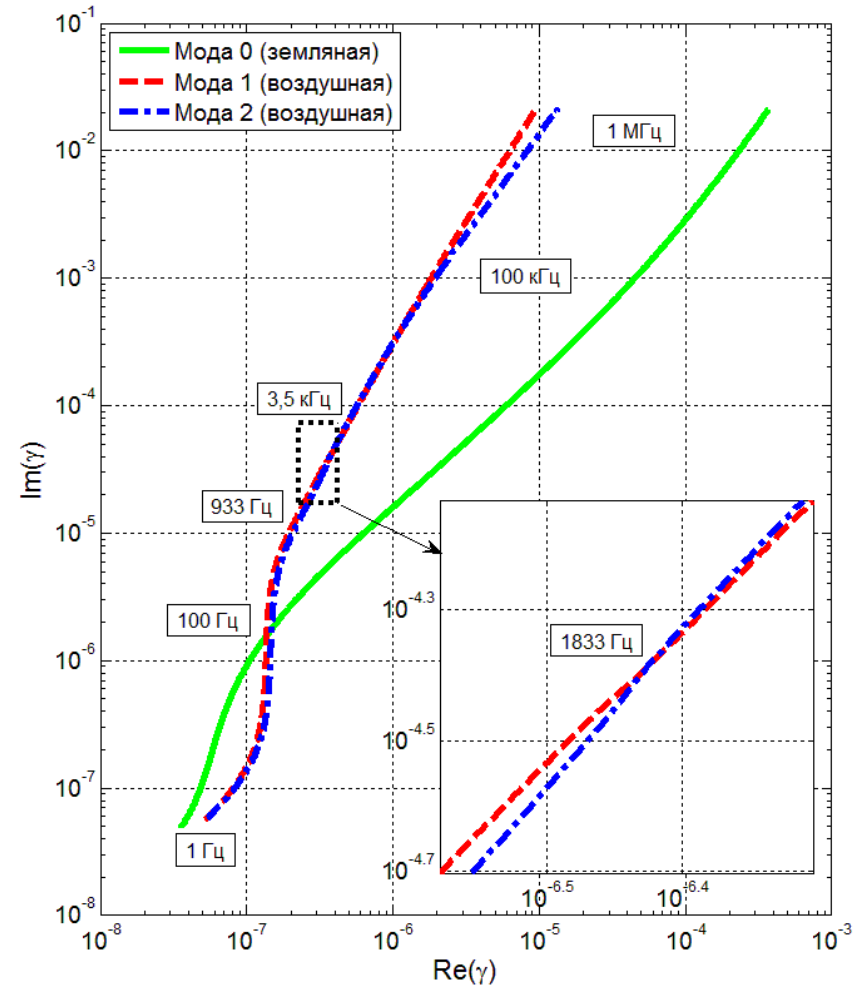


Несимметричная
линия

Годограф волновых каналов

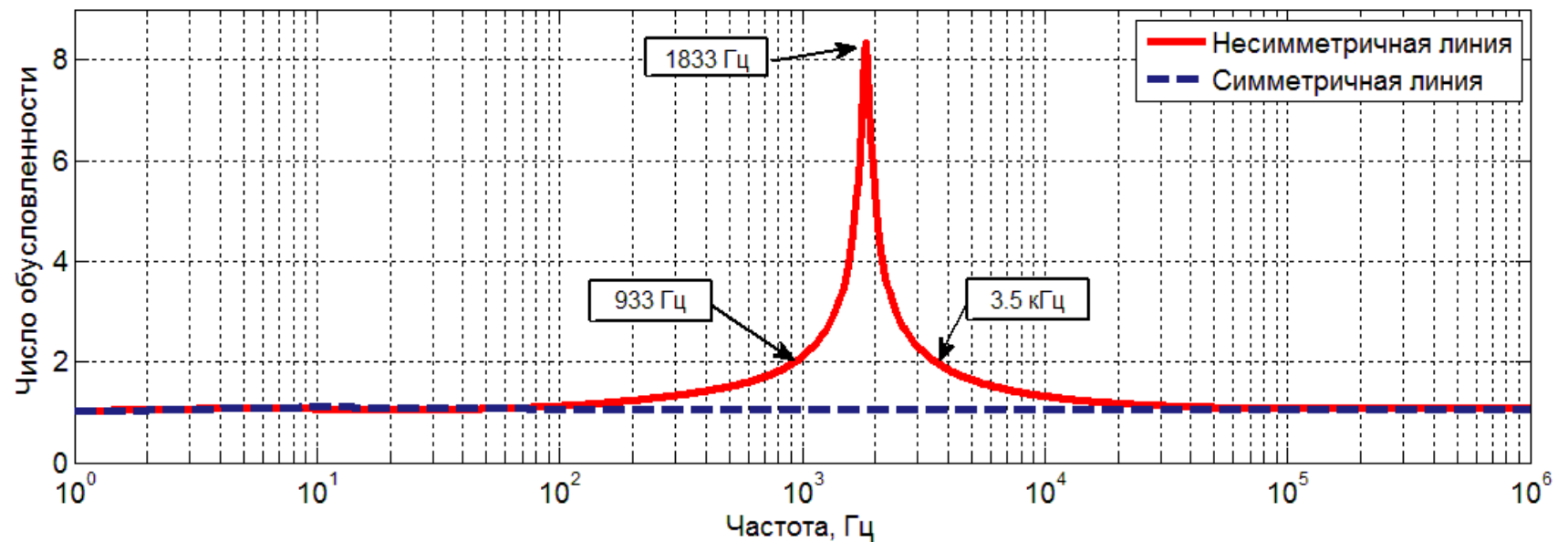
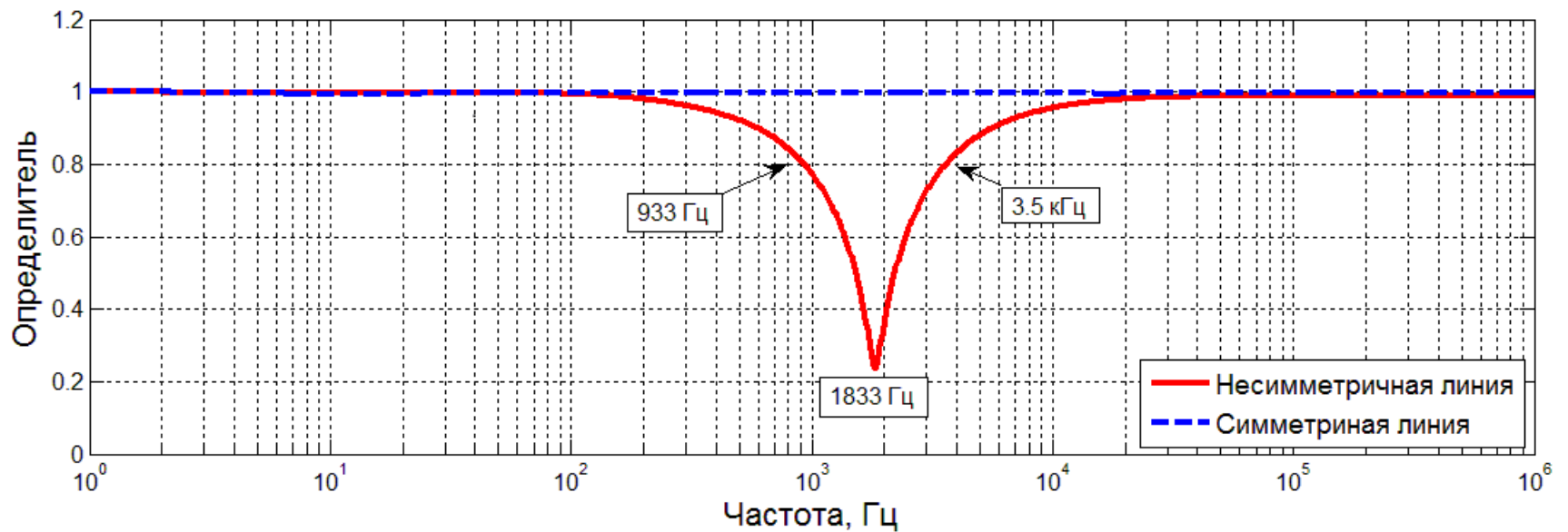


Симметричная линия



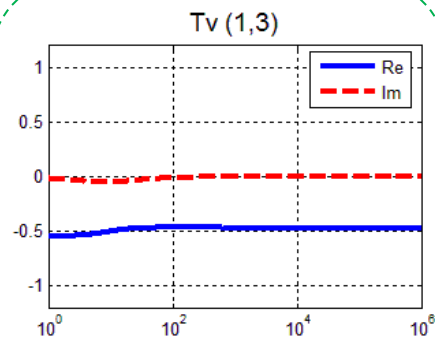
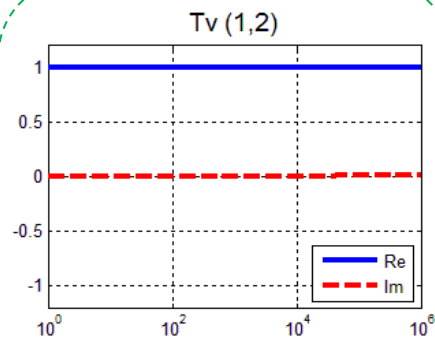
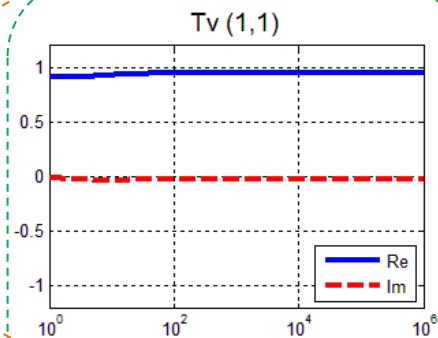
Несимметричная линия

Несимметричная линия

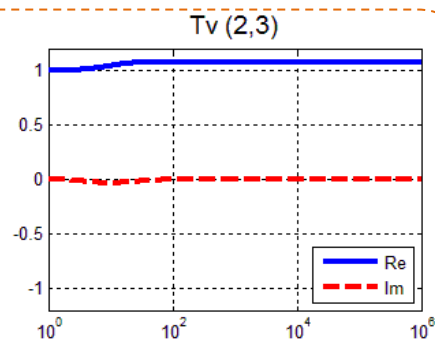
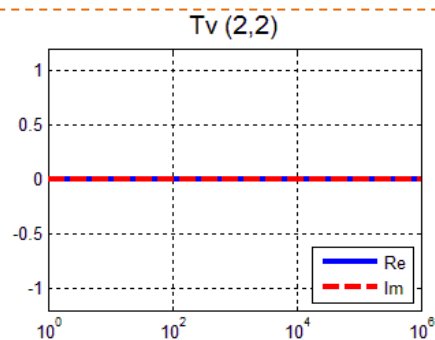
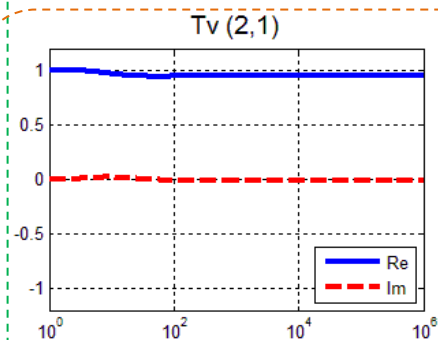


Симметричная линия (моды $\rightarrow$ фазы)

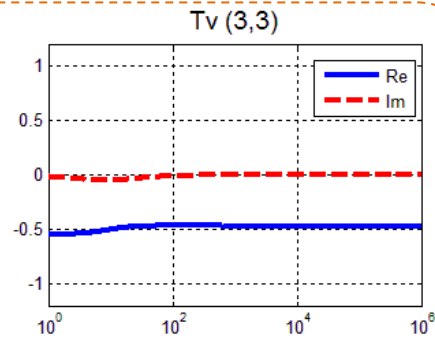
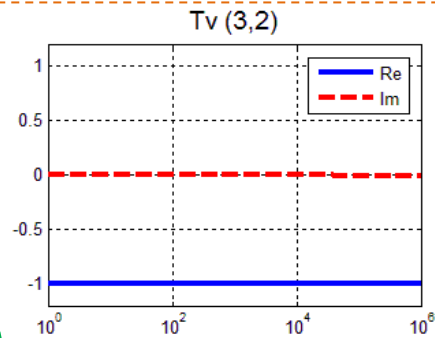
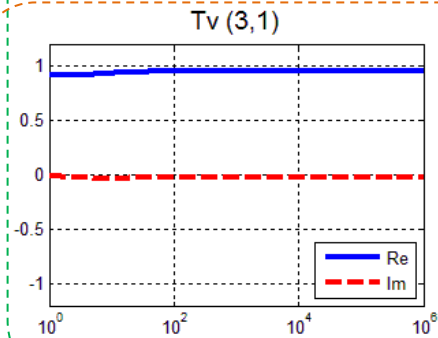
Фаза 1



Фаза 2



Фаза 3



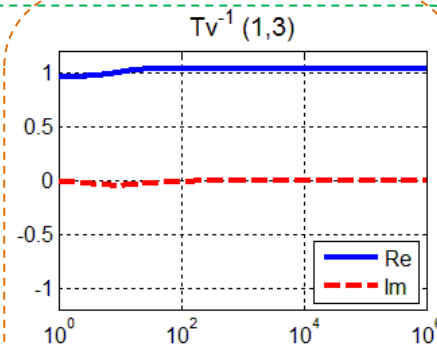
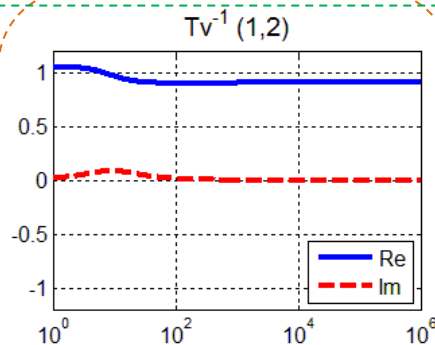
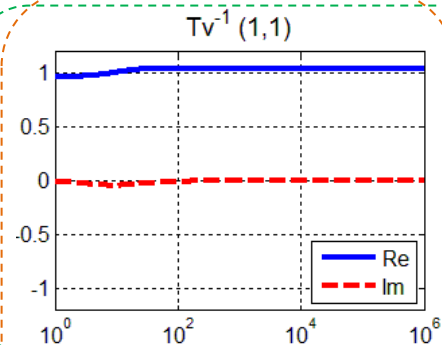
Мода 0

Мода 1

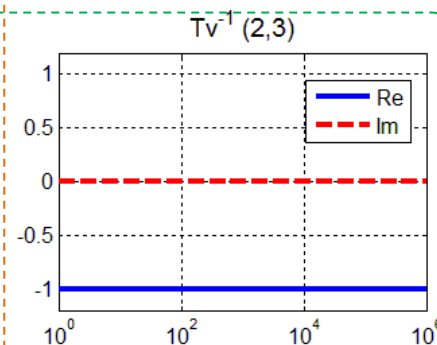
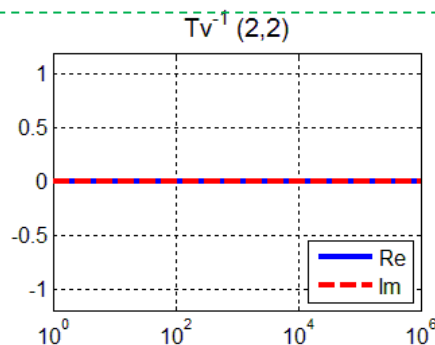
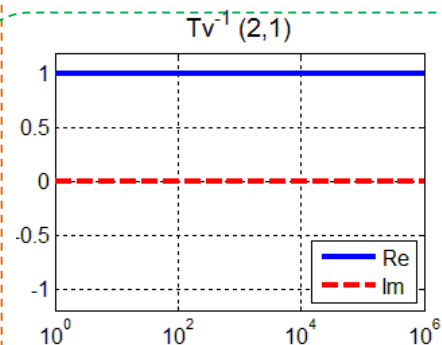
Мода 2

Симметричная линия (фазы → моды)

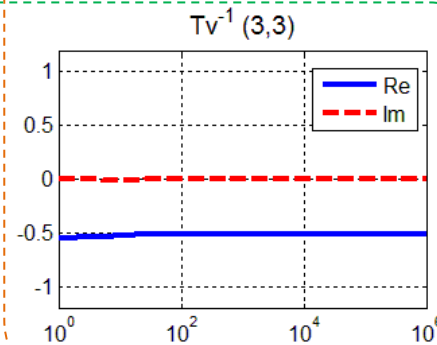
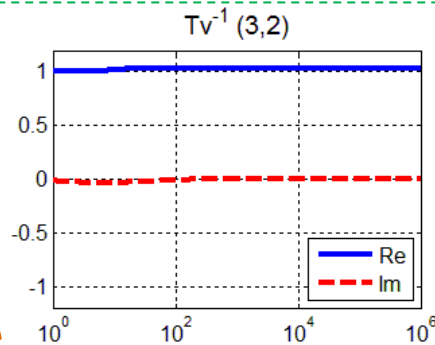
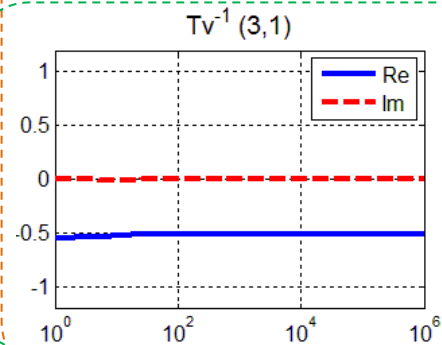
Мода 0



Мода 1



Мода 2



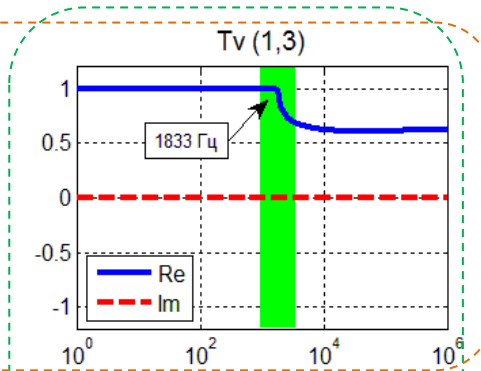
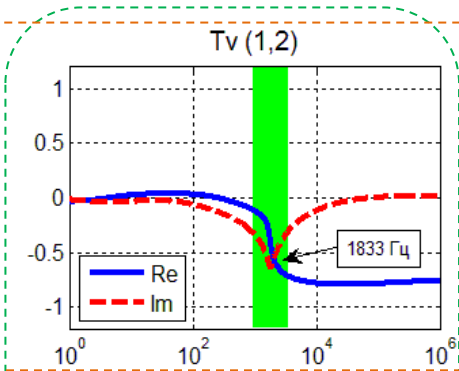
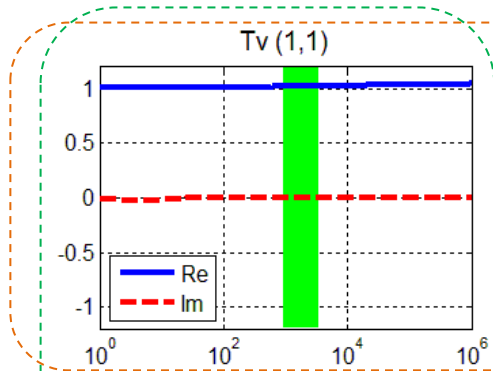
Фаза 1

Фаза 2

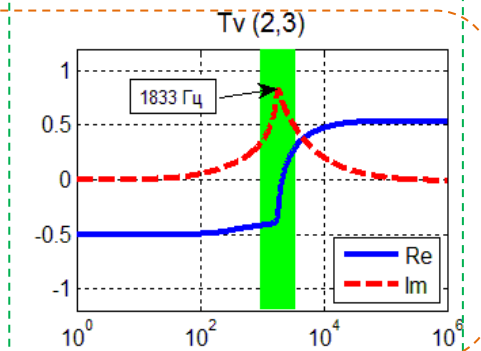
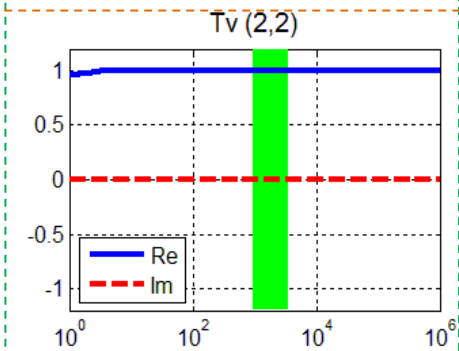
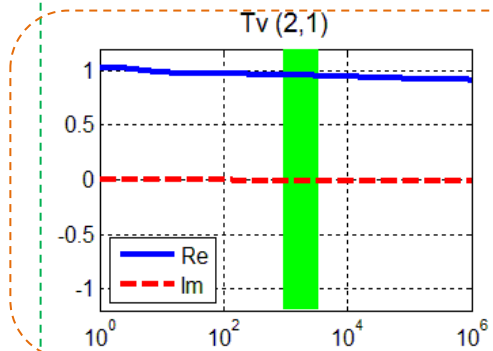
Фаза 3

Несимметричная линия (моды $\rightarrow$ фазы)

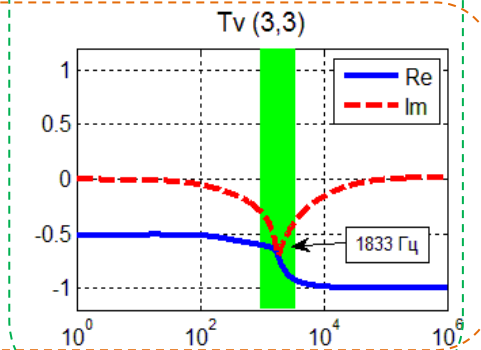
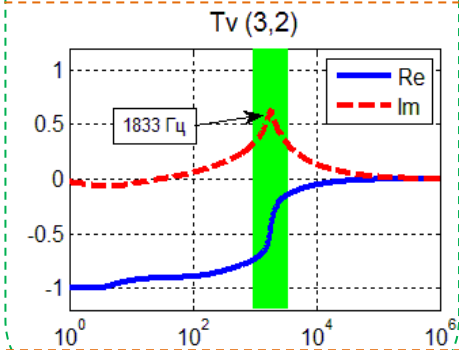
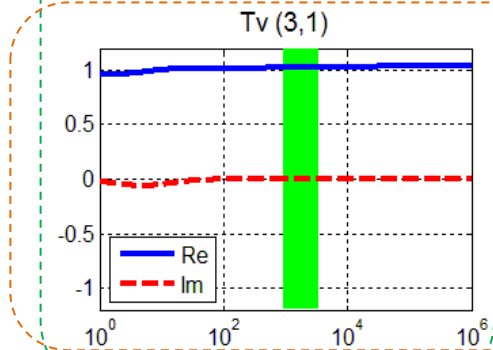
Фаза 1



Фаза 2



Фаза 3



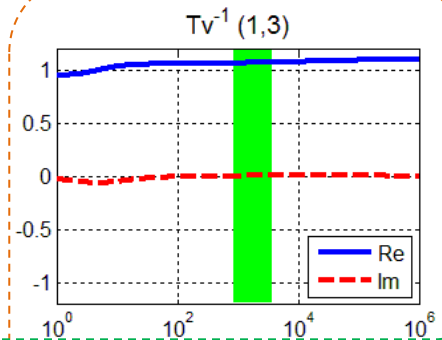
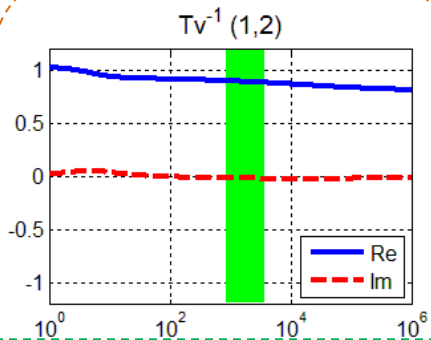
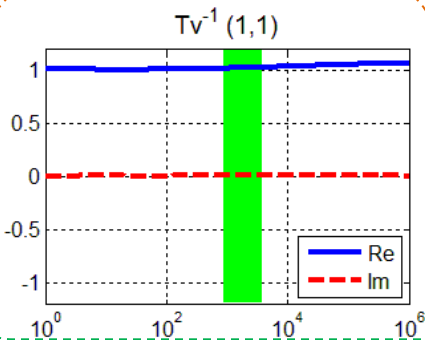
Мода 0

Мода 1

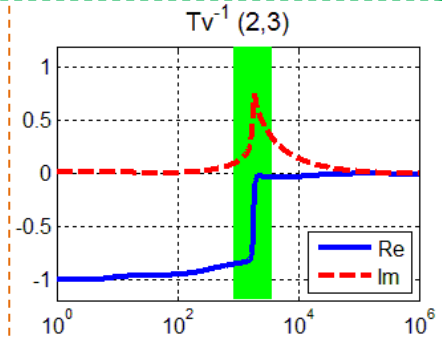
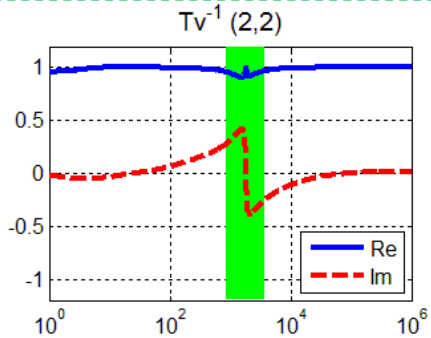
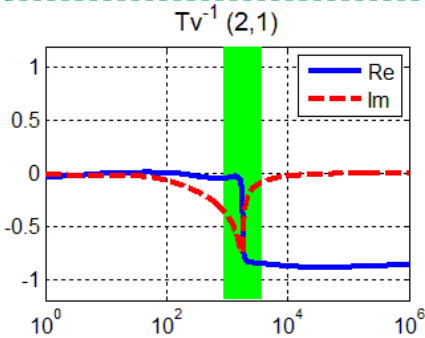
Мода 2

Несимметричная линия (фазы → моды)

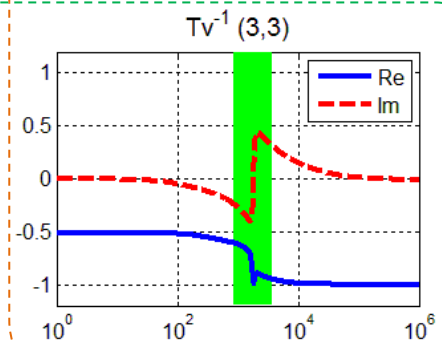
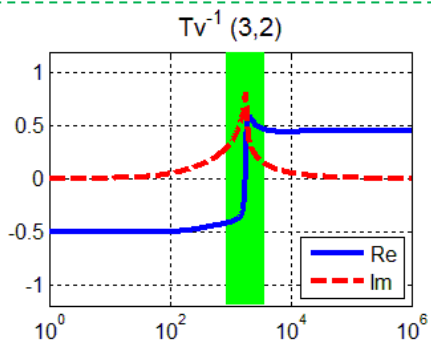
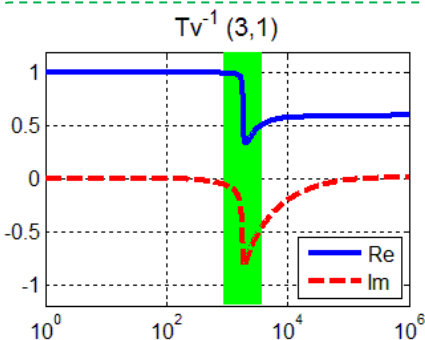
Мода 0



Мода 1



Мода 2



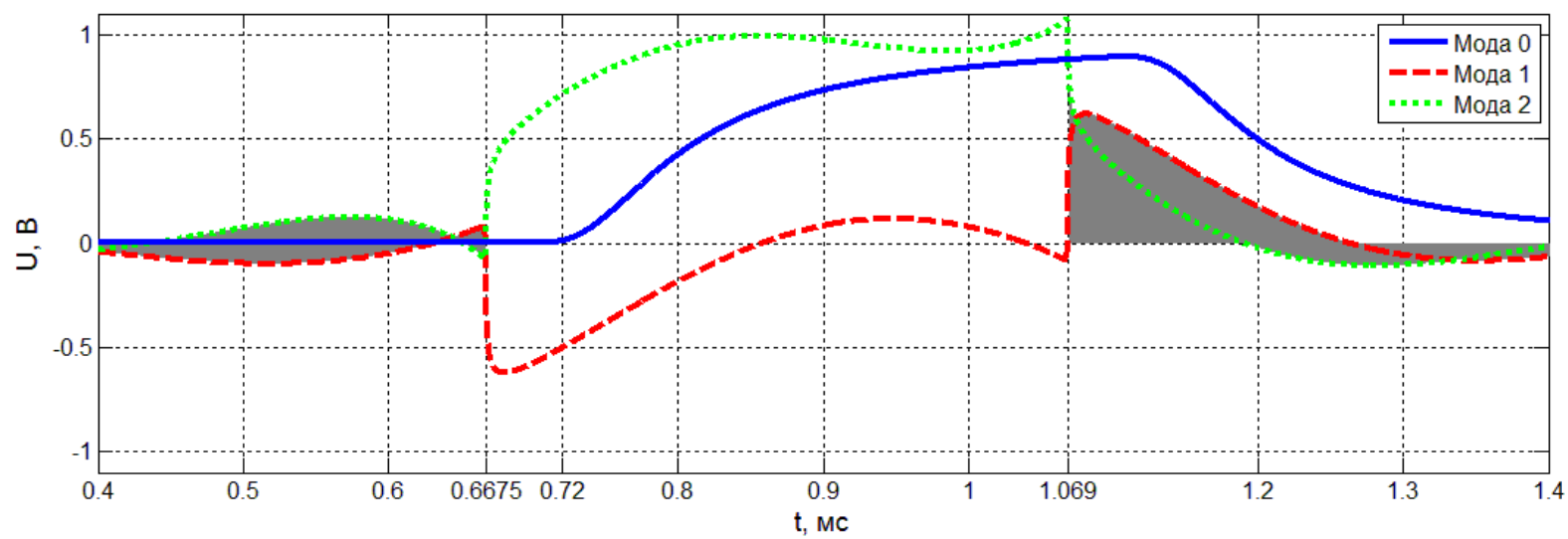
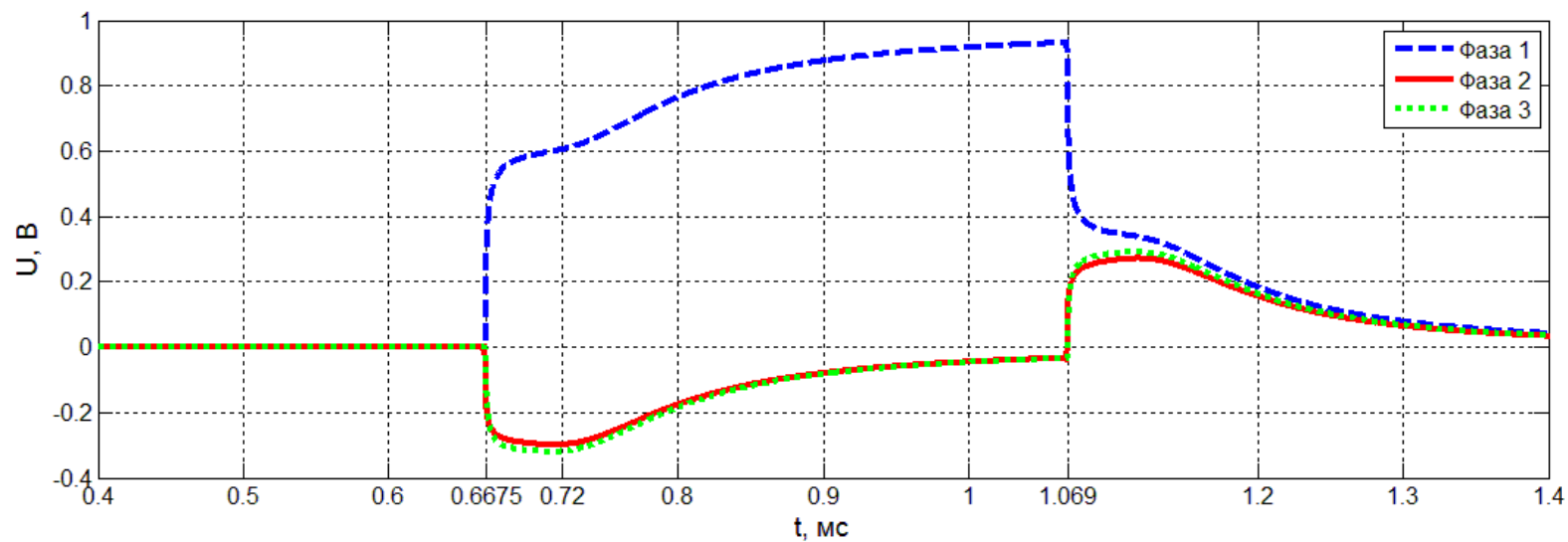
Фаза 1

Фаза 2

Фаза 3

Несимметричная линия

$L = 200$ км



Пути решения проблемы плохой обусловленности

1. Осуществить обращение матрицы модально-фазного преобразования с применением *регуляризации по Тихонову*.
2. Применить *метода малых возмущений* к исходным данным линии.
3. Рассмотреть не моды, а *модальные группы* (Жорданов базис).
- ✓ 4. Применить *аппроксимацию* к полученному результату.

Аппроксимация

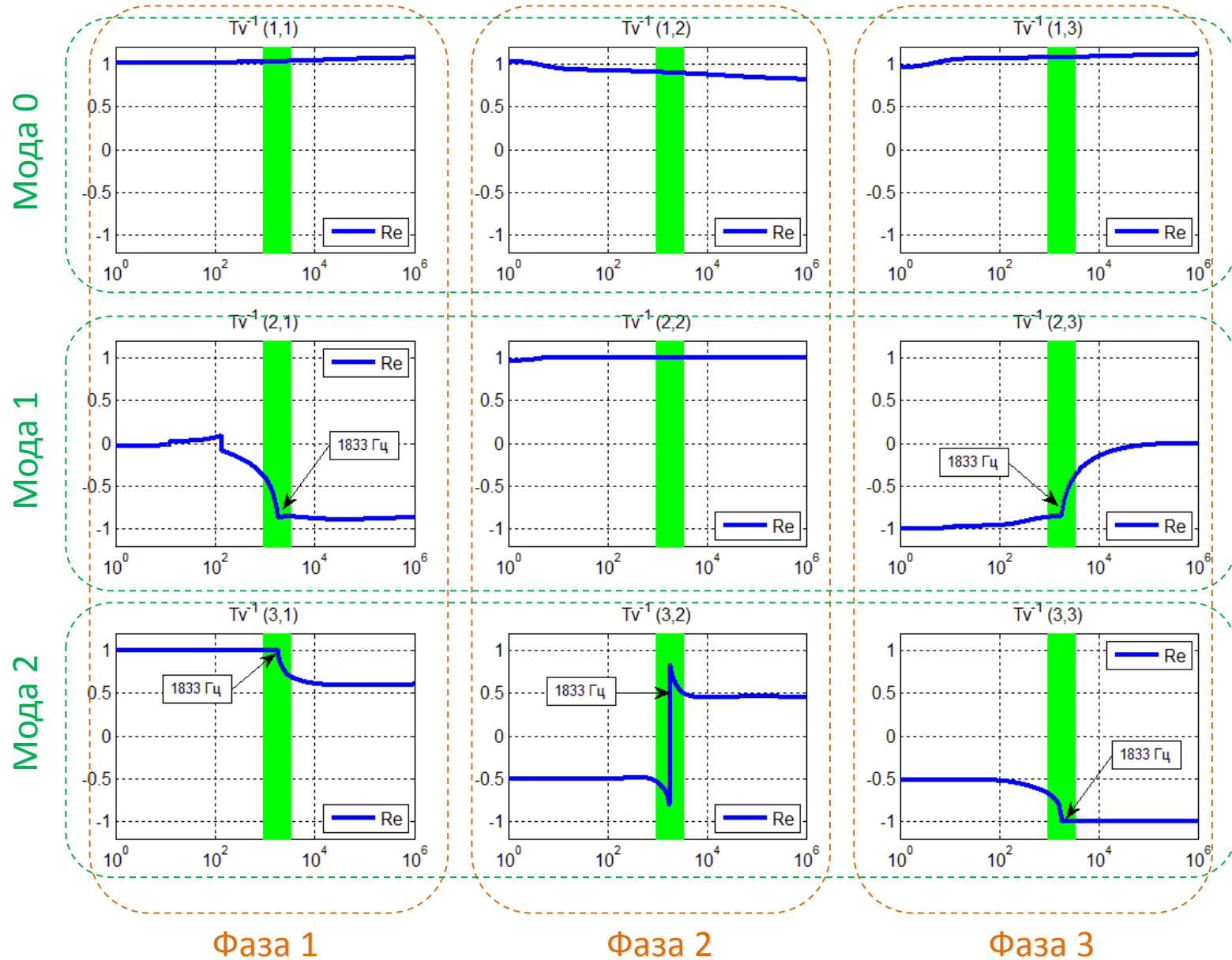
$$\forall \omega, T_{k,p}^{-1} = \underbrace{N_k(\omega')}_{\text{Нормирующий множитель}} \cdot \underbrace{\text{Sgn}(\text{Re}\{T_{k,p}^{-1}(\omega')\})}_{\text{Знак «+» / «-»}} \cdot \underbrace{|T_{k,p}^{-1}(\omega')|}_{\text{Величина (модуль)}}$$

Частота аппроксимации

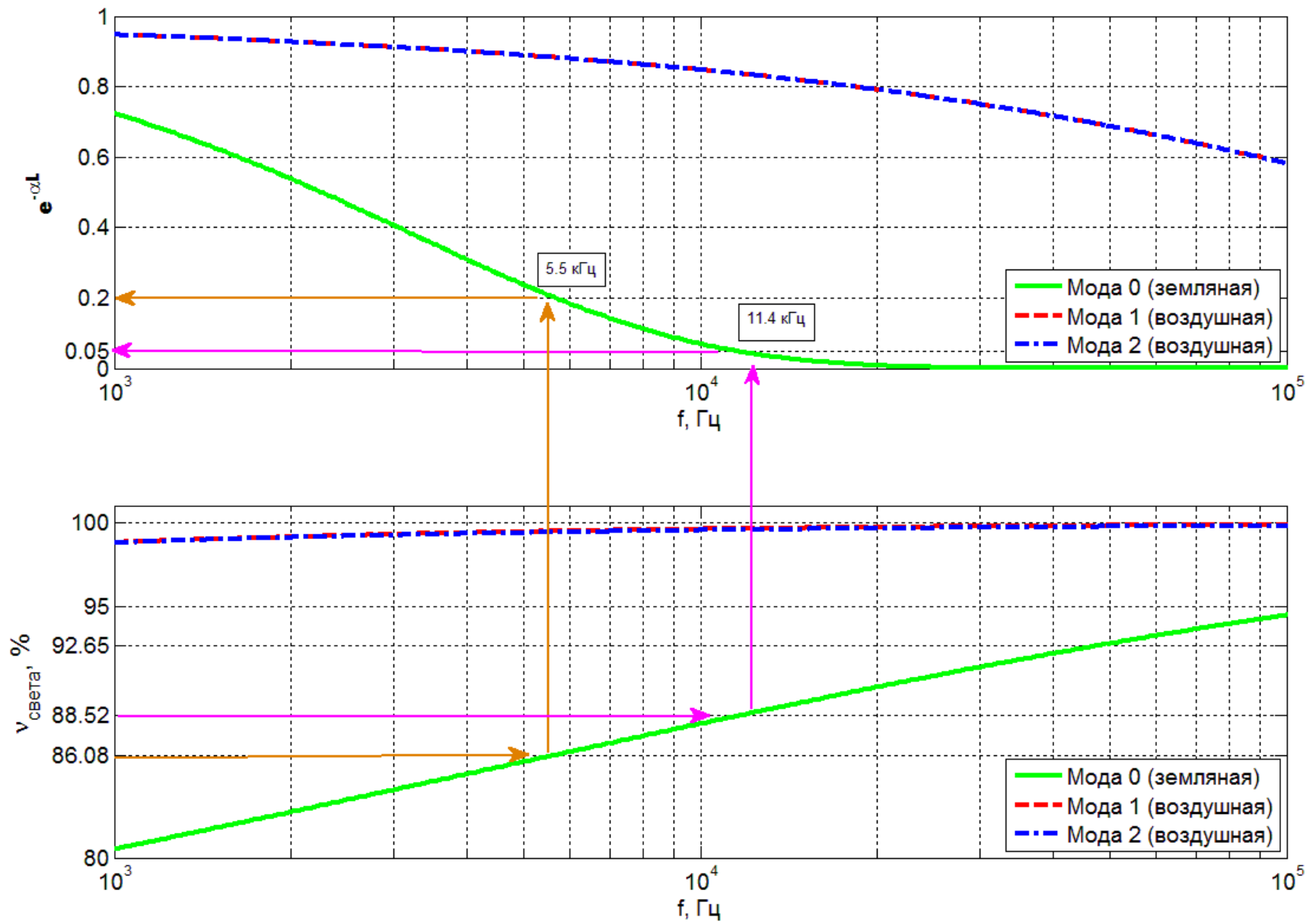
Количество волновых каналов

$$N_k(\omega') = \begin{cases} \frac{n}{\text{Re}\left\{\sum_{i=1}^n T_{k,i}^{-1}(\omega')\right\}}, & k=1 \\ \frac{1}{\max_i \left(|T_{k,\forall i}^{-1}(\omega')|\right)}, & k \neq 1 \end{cases}$$

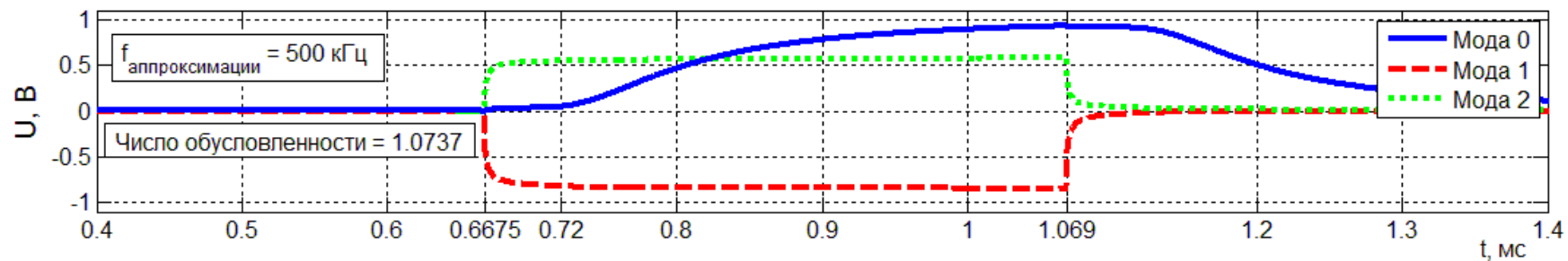
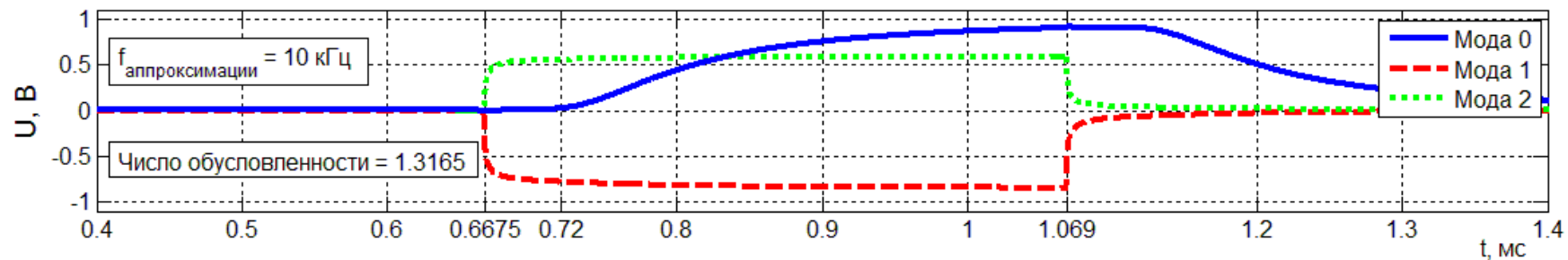
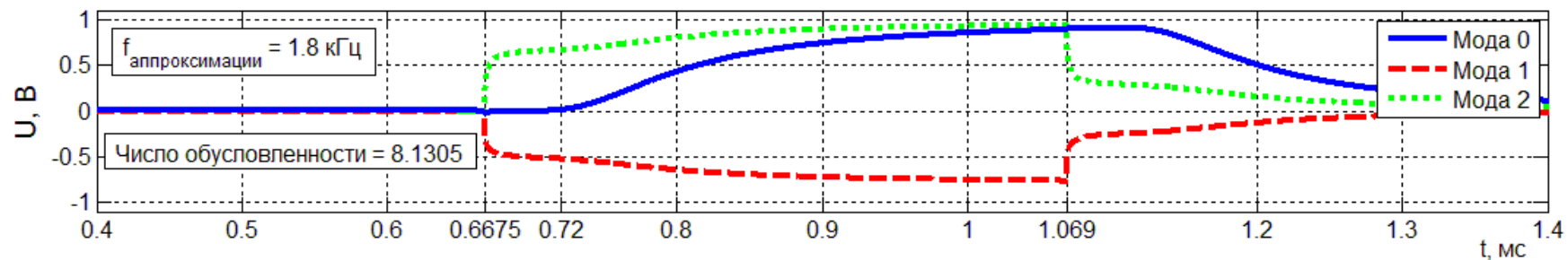
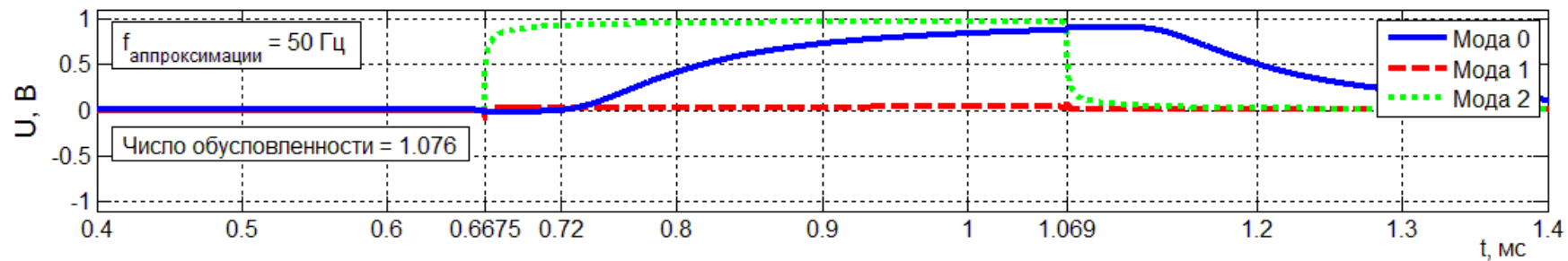
Аппроксимация несимметричной линии (фазы → моды)



Скорость и затухание



Влияние частоты аппроксимации



«Стандартные» преобразования для симметричных линий

Edith Clarke

$$\forall \omega, T^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

Leonard Martin Wedepohl

$$\forall \omega, T^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ \frac{1}{2} & -1 & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

Karrenbauer

$$\forall \omega, T^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

Аппроксимация преобразования для несимметричной линий

$$T_V^{-1}(50 \Gamma u) = \begin{bmatrix} +1.0115 & +0.9250 & +1.0635 \\ +0.0359 & +1.0000 & -0.9647 \\ +1.0000 & -0.5042 & -0.5165 \end{bmatrix}$$

$$T_V^{-1}(1.8 \kappa \Gamma u) = \begin{bmatrix} +1.0275 & +0.8971 & +1.0757 \\ -0.8751 & +1.0000 & -0.8327 \\ +1.0000 & +0.8153 & -0.9533 \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} \Sigma \neq 0 \\ \Sigma \neq 0 \end{array}$$

$$T_V^{-1}(10 \kappa \Gamma u) = \begin{bmatrix} +1.0404 & +0.8746 & +1.0854 \\ -0.8783 & +1.0000 & -0.1517 \\ +0.6123 & +0.4474 & -1.0000 \end{bmatrix}$$

$$T_V^{-1}(500 \kappa \Gamma u) = \begin{bmatrix} +1.0687 & +0.8243 & +1.1070 \\ -0.8722 & +1.0000 & -0.0071 \\ +0.5970 & +0.4548 & -1.0000 \end{bmatrix}$$

Выводы

1. Несимметричные линии имеют могут иметь фазо-модальное преобразование со значительной частотной зависимостью.
2. Получить корректное фазо-модальное преобразование несимметричной линии во всей частотной области не всегда представляется возможным. Причина – плохая обусловленность.
3. В устройстве, реализующим функцию двухстороннего ВОМП, даже в случае несимметричной линии можно использовать известные преобразования для симметричной линии