



РОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
ПО МОЛНИЕЗАЩИТЕ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
17-19 МАЯ 2016 г.

ФОНД СОДЕЙСТВИЯ РАЗВИТИЮ  
малых форм предприятий в научно-технической сфере

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛИНИЯХ ПРИ УДАРАХ МОЛНИИ

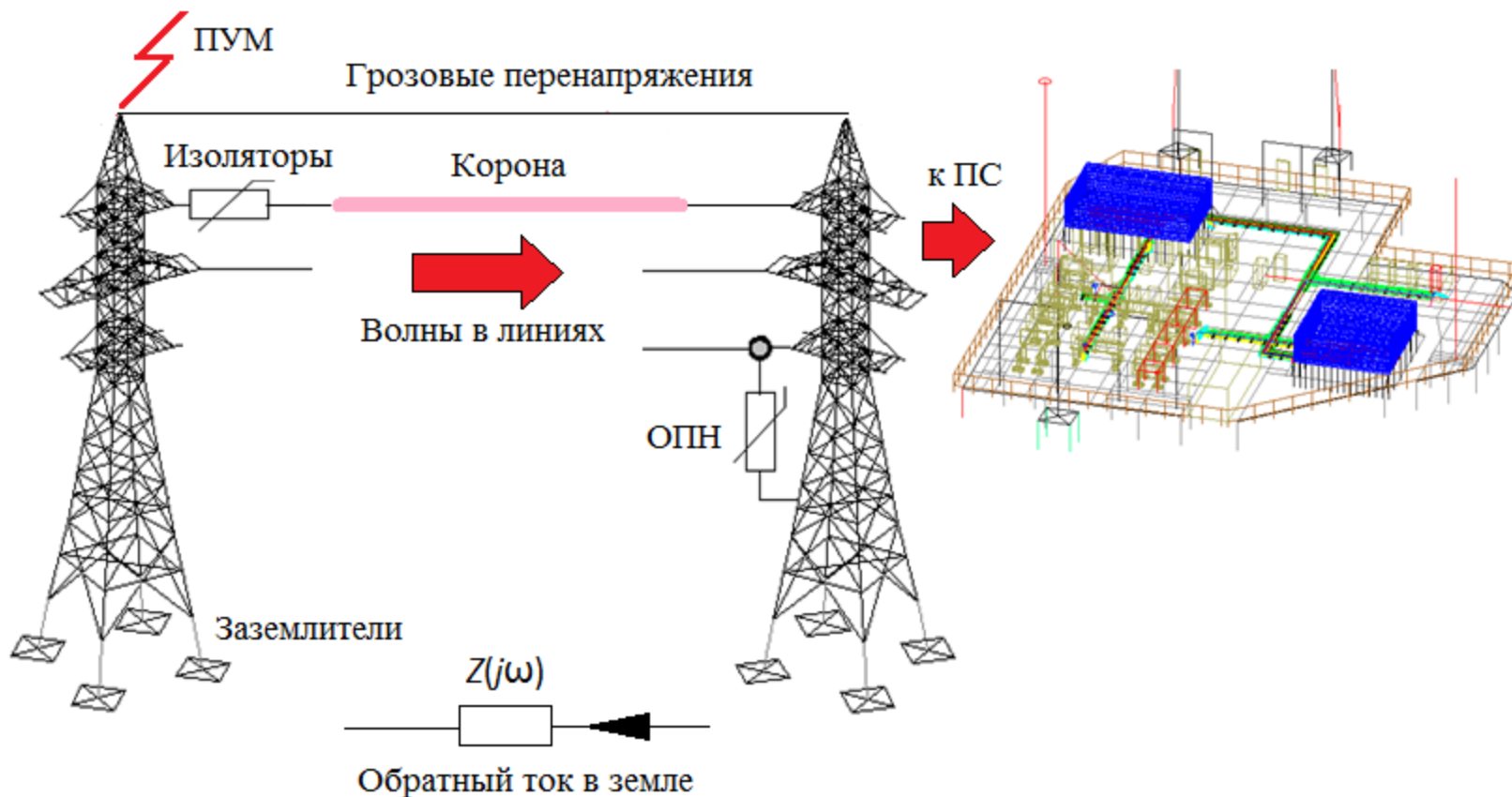
Шишигин Д.С., Шишигин С.Л.

shishigind@yandex.ru

Вологодский государственный университет,

ООО «ЗУМ»

**Задача:** Рассчитать волновые процессы в линии при ударе молнии в провод или в опору или в грозозащитный трос с учетом нелинейных и частотно-зависимых элементов

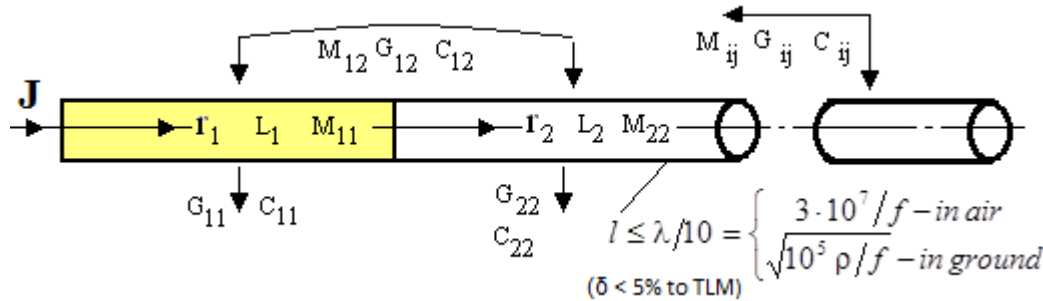


Стандартное решение: Расчет схемы замещения ВЛ и ПС в программе **EMTP**  
Новое решение: Расчет 3D модели ВЛ и ПС в программе **ЗУМ**

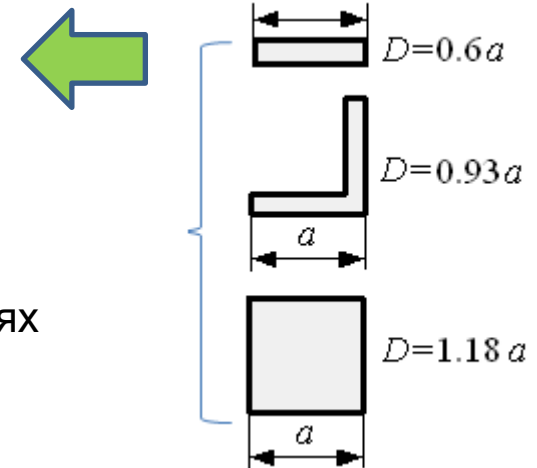
# Цепно-полевая модель проводника

## 1. Полевая модель

расчет интегральных (матрицы **G**, **M**, **C**) и дифференциальных (**φ**, **E**, **H**) параметров ЭМП

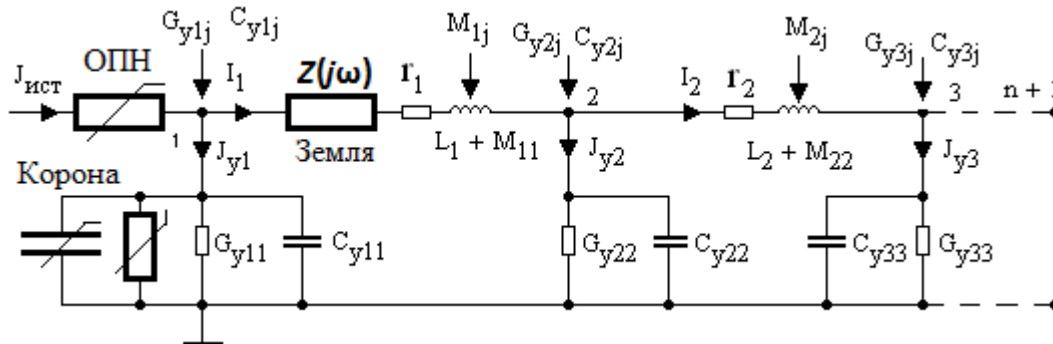


Эквивалентный диаметр



## 2. Цепная модель

расчет **u**, **i**, **z** при синусоидальных и импульсных воздействиях



Проводник любого сечения может быть представлен проводником круглого сечения

**Цель 1:** Показать, что многозвенная цепная схема с сосредоточенными параметрами является полноценным аналогом длинной линии, включая эффекты запаздывания, отражения и преломления волн

# Методы расчета переходных процессов

## Требования к выбору метода

- Устойчивость при решении жестких задач.  
Импульс тока молнии имеет короткий фронт и большую длительность
- Учет нелинейных и частотно-зависимых сопротивлений.
- Высокая точность для расчета длительных волновых процессов при большом шаге



## 1. Частотный метод.

Не используется, поскольку нельзя учесть нелинейные элементы

## 2. Метод дискретных резистивных схем

Стандарт в настоящее время

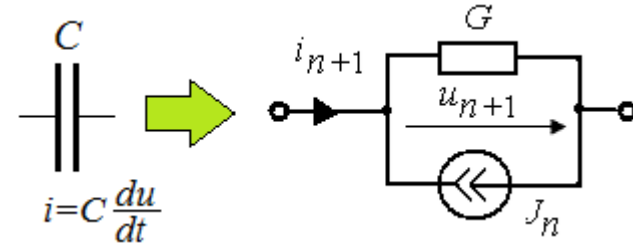
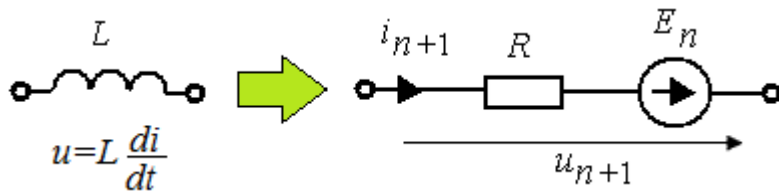
## 3. Операторный метод

В настоящее время практически не используется.

**Цель 2:** Показать, что шаговый алгоритм на основе операторного метода является наиболее эффективным для расчета волновых процессов.

# Метод дискретных резистивных схем

**Идея.** Замена индуктивностей и емкостей резистивными схемами на каждом временном шаге длиной  $h$



Формула Эйлера  
(1-й порядок)

$$R = \frac{L}{h}; \quad E_n = \frac{L}{h} i_n$$

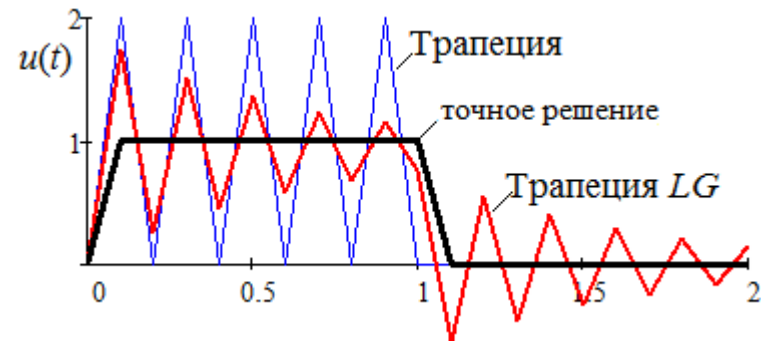
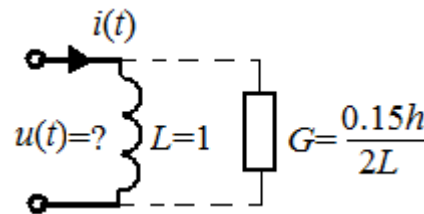
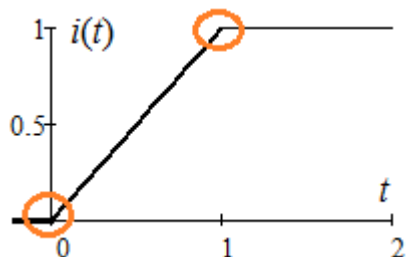
$$G = \frac{C}{h}; \quad J_n = \frac{C}{h} u_n$$

Формула трапеций  
(2-й порядок)

$$R = \frac{2L}{h}; \quad E_n = \frac{2L}{h} i_n + u_n$$

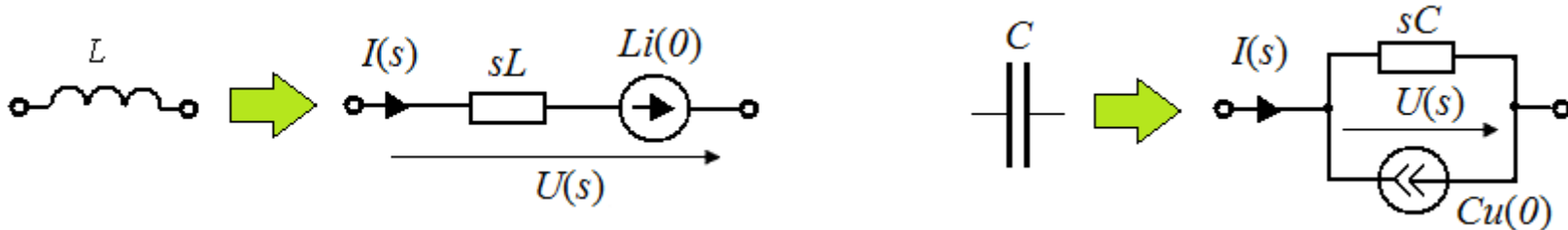
$$G = \frac{2C}{h}; \quad J_n = \frac{2C}{h} u_n + i_n$$

**Недостатки:** Формула Эйлера неточна. Формула трапеций – осцилляции (для негладких функций). **Задача F.L.Alvarado** (IEEE Trans. PAS-102, No 12, 1983)



# Операторный метод

1. Замена индуктивностей и емкостей операторными изображениями.



2. Расчет операторной схемы

3. Возврат к оригиналам на основе теоремы о вычетах.

Стандартный способ: оригинал = сумме вычетов в полюсах функции  $F(s)$ . Его нельзя применить для сложных схем.

$$f(t) = \sum_i \operatorname{Res}[F(s_i) \cdot e^{s_i t}]$$

Способ И.Влаха и К.Синхгала: оригинал = сумме вычетов в полюсах экспоненты, которая аппроксимируется дробно-рациональной функцией:

$$f(t) = \sum_i \operatorname{Res} F(z_i/t) \cdot e^{z_i t}, \quad z = st$$

$$e^z \approx \frac{a_0 + a_1 \cdot z + \dots + a_n \cdot z^n}{1 + b_1 \cdot z + \dots + b_m \cdot z^m} = \begin{cases} 1/(1-z), & n=0, m=1, \\ (1+z/3)/(1-2z/3+z^2/6), & n=1, m=2 \end{cases}$$



$$f_1(t) = F(s)/t, \quad s = 1/t$$

$$f_3(t) = \operatorname{Re}[(5\sqrt{2}j - 2)F(s)/t], \quad s = (2 + \sqrt{2}j)/t$$

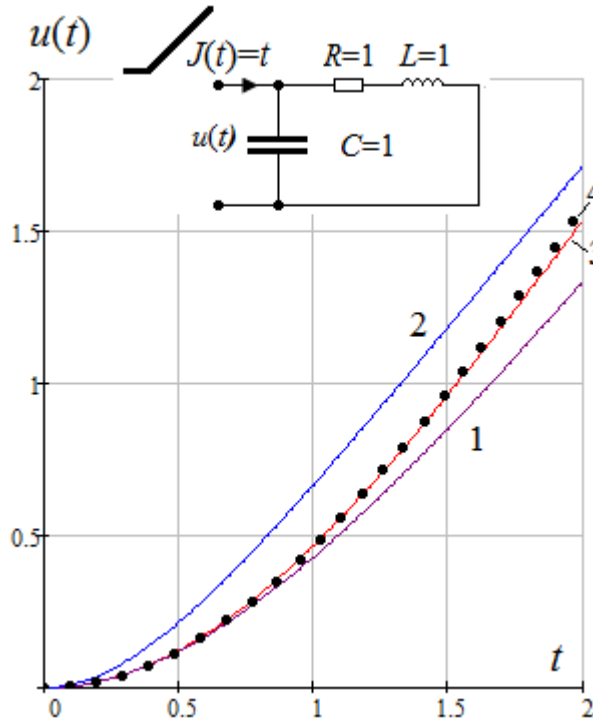
Эти формулы абсолютно устойчивы, но их погрешность возрастает с увеличением времени  $t$ , поэтому их можно использовать только в шаговых алгоритмах.

**Шаговый алгоритм.** Расчет проводится на малом временном шаге длиной  $h$ , затем повторяется на следующем шаге с новыми начальными условиями. Аналогия с методом дискретных резистивных схем, но **дискретные схемы комплексные**.

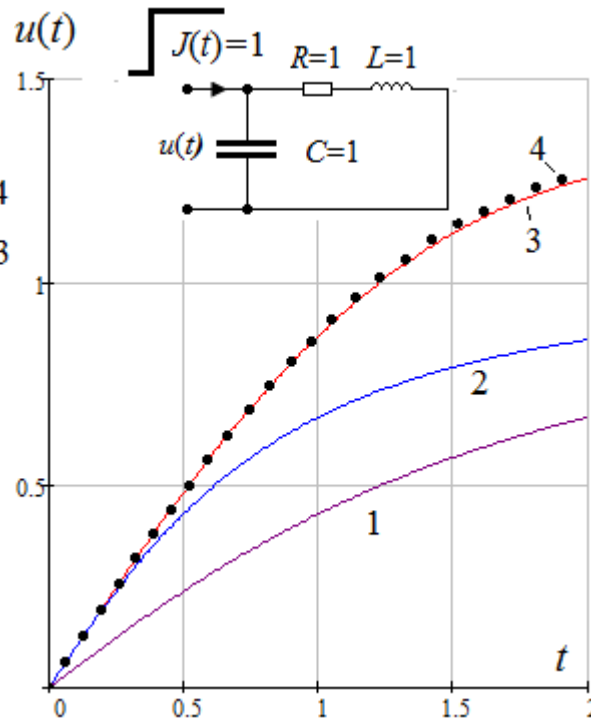
# Исследование шаговой погрешности на модельных задачах

Сделаем один шаг переменной длины  $h=t$ .

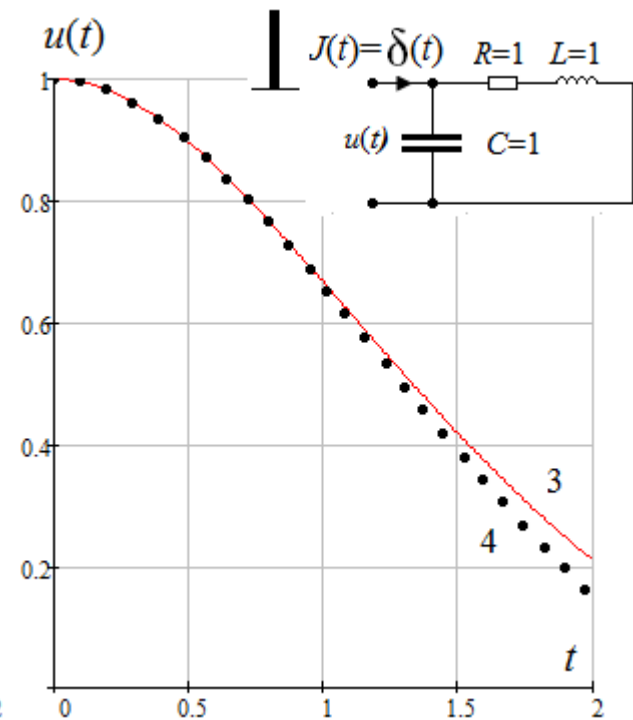
Линейный ток



Ступенька тока



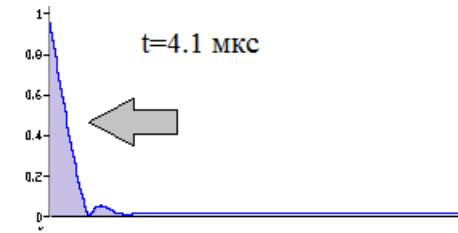
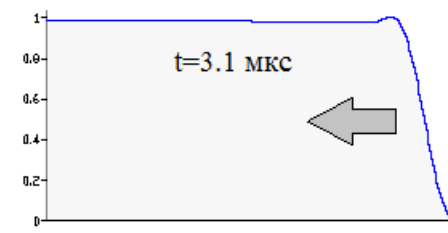
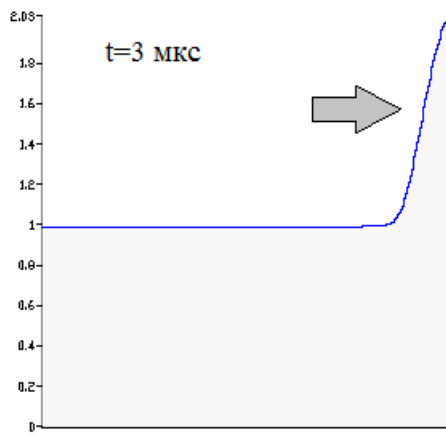
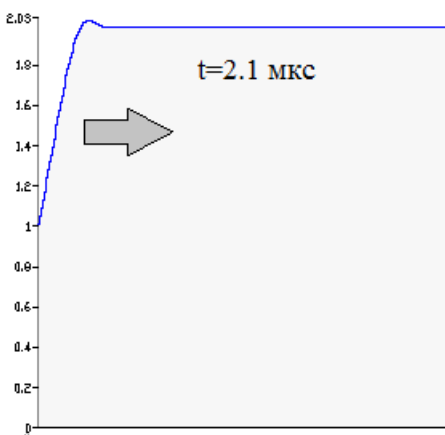
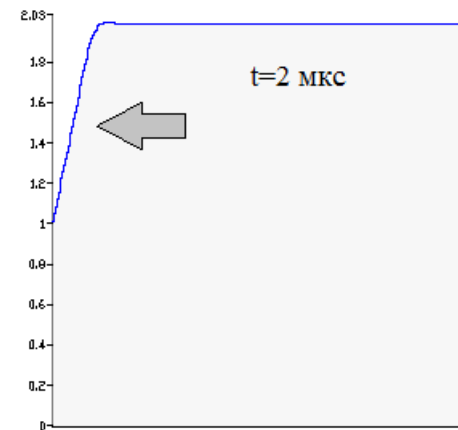
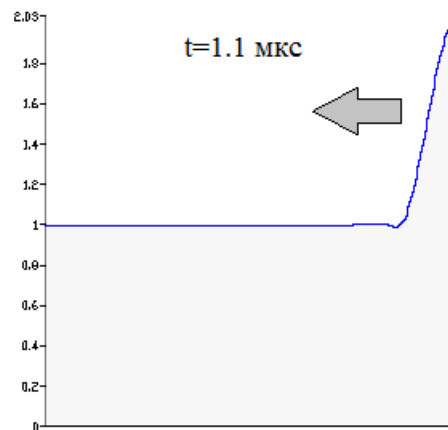
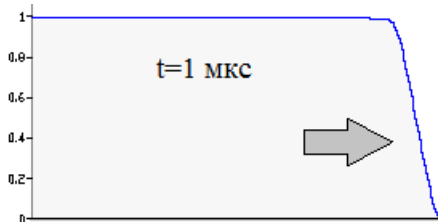
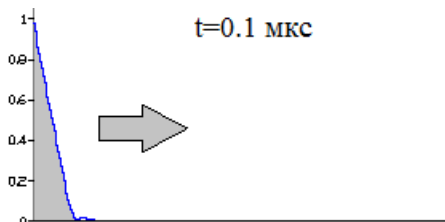
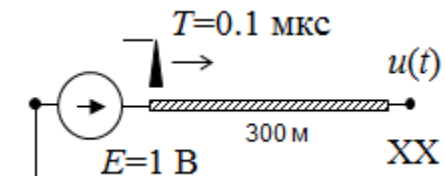
Импульс тока



Обозначения:

1 - формула Эйлера, 2 - формула трапеций, 3 - ША 3 порядка, 4 - точное решение

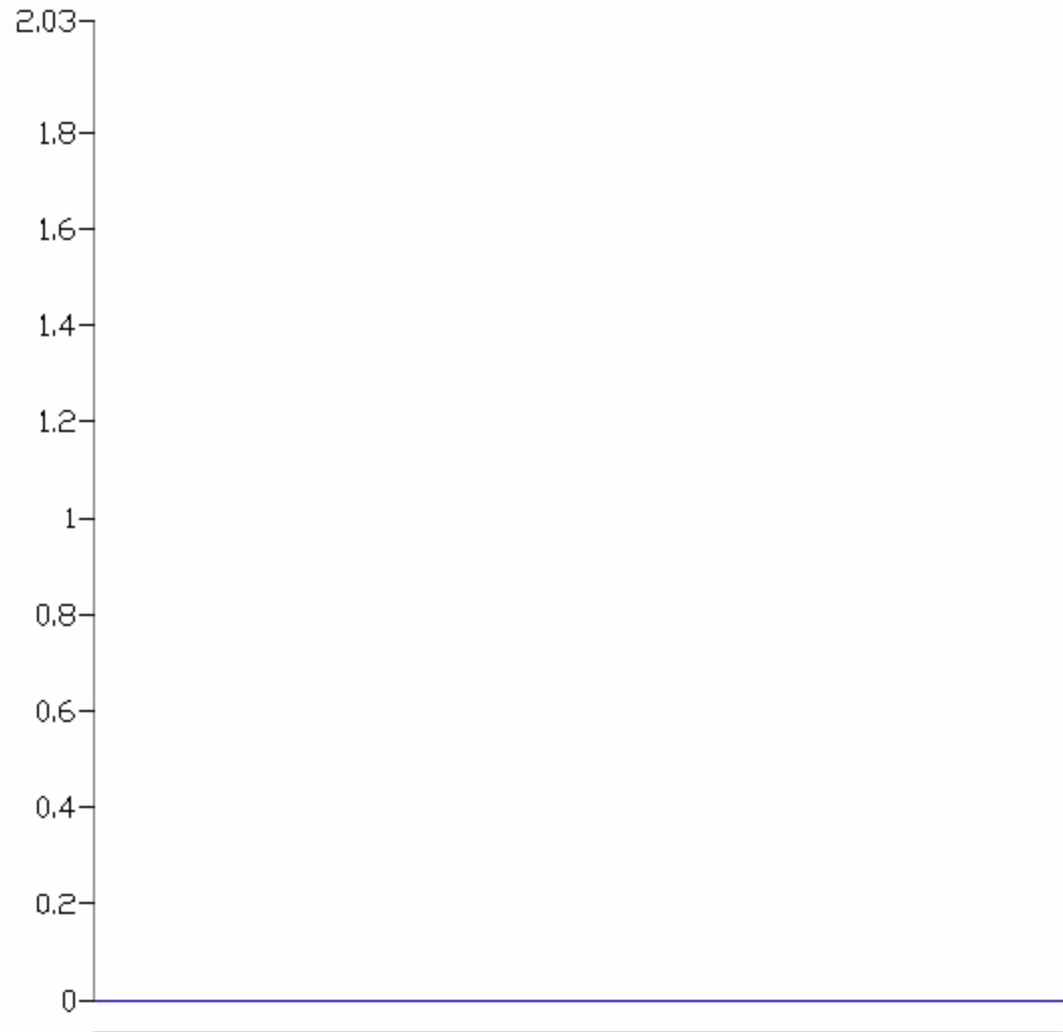
# Моделирование волнового процесса в линии



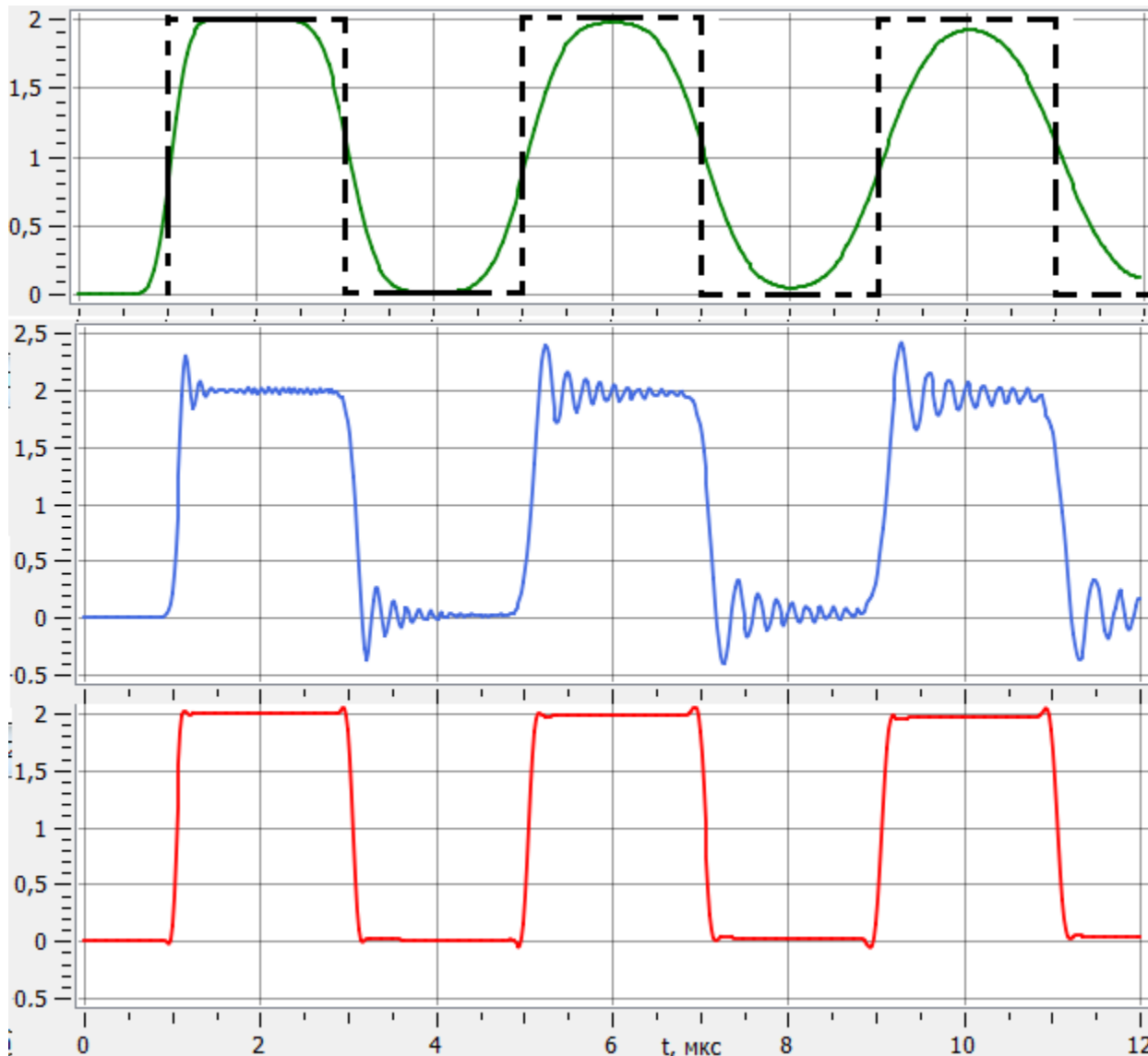
**Вывод:** Волновые процессы (запаздывание, отражение) моделируются с высокой точностью с помощью многосвязных цепных схем. Решены другие задачи с активной и реактивной нагрузкой.



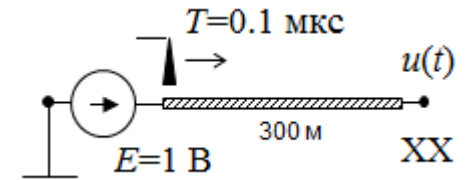
# 3D-анимация волновых процессов



# Сравнение шаговых алгоритмов



Напряжение в конце линии



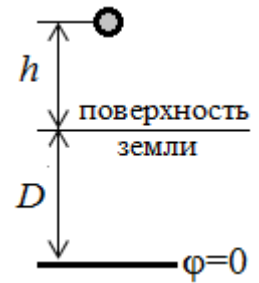
1. Формула Эйлера  
неточна

2. Формула трапеций  
приводит к  
осцилляциям решения

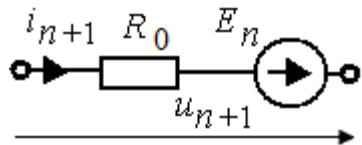
3. ША 3 порядка дает  
требуемую точность  
(погрешность 2%)  
ША 7 порядка позволяет  
решить задачу с той же  
точностью за меньшее  
число шагов

# Моделирование частотно-зависимого сопротивления земли $Z(j\omega)$ во временной области

Аппроксимация формулы Карсона  $Z(j\omega) = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln\left(1 + \frac{D}{h}\right)$ ,  $D = \sqrt{\frac{\rho}{j\omega\mu_0}}$



- 1. Эквивалентные схемы** (недостаток - для каждого  $\rho$  своя схема)
- 2. Дискретная модель** с постоянным сопротивлением и переменной ЭДС (проста, универсальна); [Электричество №1, 2010, с.16-23]

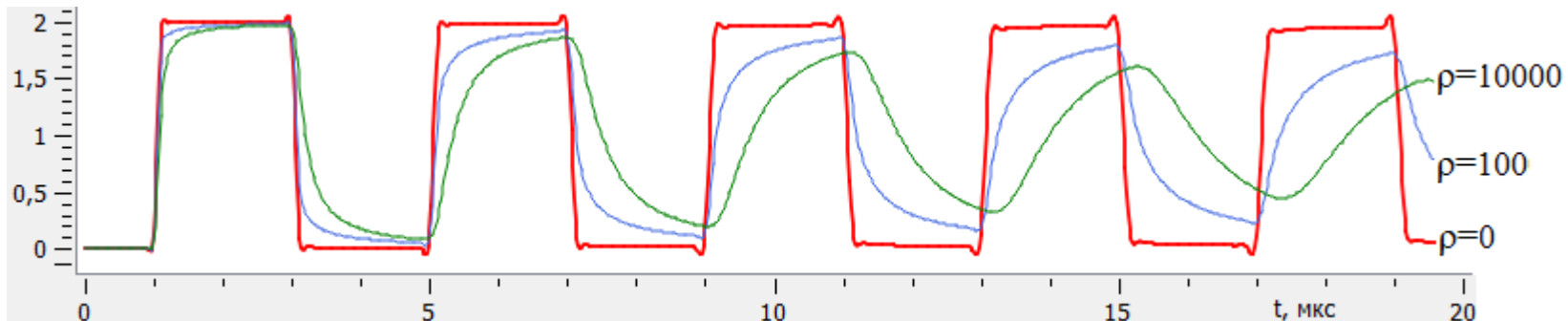
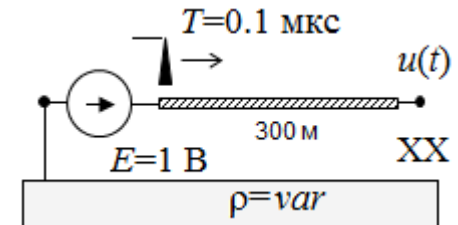


$$E_n = \sum_{m=1}^n (R_{n-m} - R_{n-m+1}) i_m \quad R_n = \frac{z_t(nh+1) - z_t(nh)}{h}$$

$$z_t(t) = L^{-1}\{Z(s)/s^2\}, Z(s) \leftarrow Z(j\omega)$$

**Достоверность** подтверждается частотным методом.

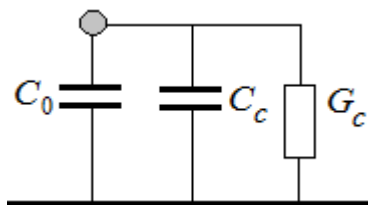
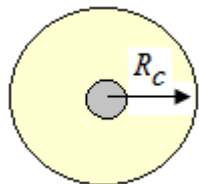
**Пример.** Волновые процессы в линии с учетом сопротивления земли



**Вывод.** Земля существенно искажает фронт и амплитуду волны

# Моделирование импульсной короны

Коронный разряд моделируется динамической емкостью и проводимостью



$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln(2h/R)}$$

**Lee**

$$C_c(u) = 2\sigma_c \sqrt{\frac{r}{2h}} \left(1 - \frac{U_0}{u}\right) l \cdot 10^{-11}, \sigma_c = 30,$$

$$G_c(u) = 2\sigma_g \sqrt{\frac{r}{2h}} \left(1 - \frac{U_0}{u}\right)^2 l \cdot 10^{-11}, \sigma_g = 10^7$$

**Gary**

$$C_c(u) = C_0 \left[ \eta (u/U_0)^{\eta-1} - 1 \right], \eta = 0.22R + 1.2$$

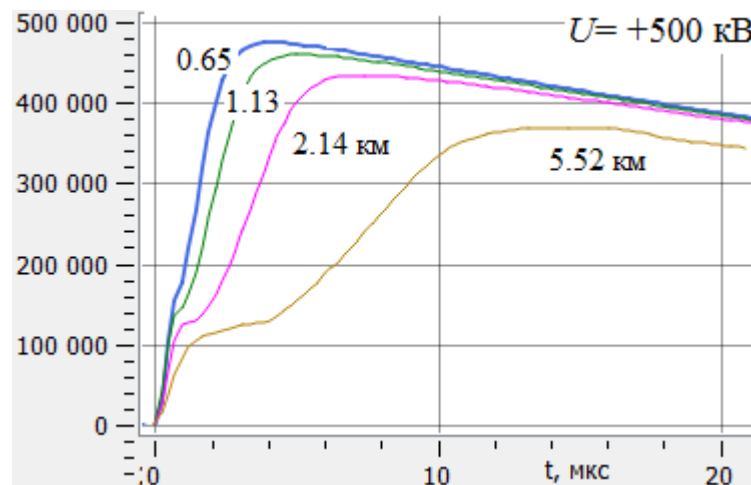
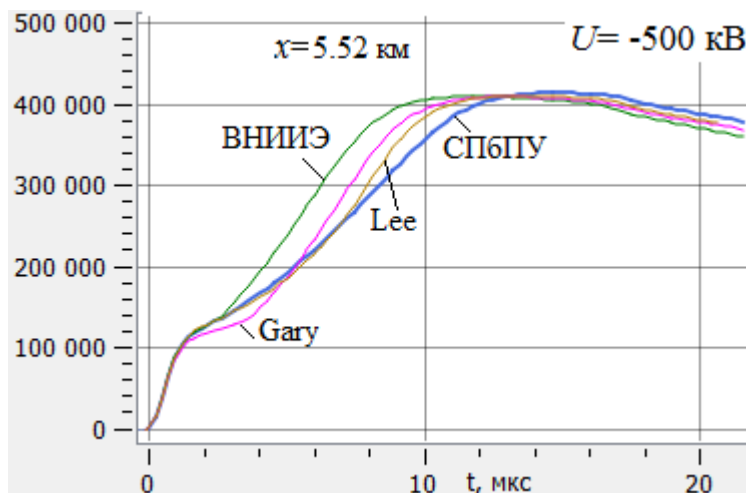
**СПБПУ**

$$C_c(u) = C_0 \cdot 5/3 \cdot k (u/U_0 - 1)^{2/3}, k_- = 0.375, k_+ = 0.78$$

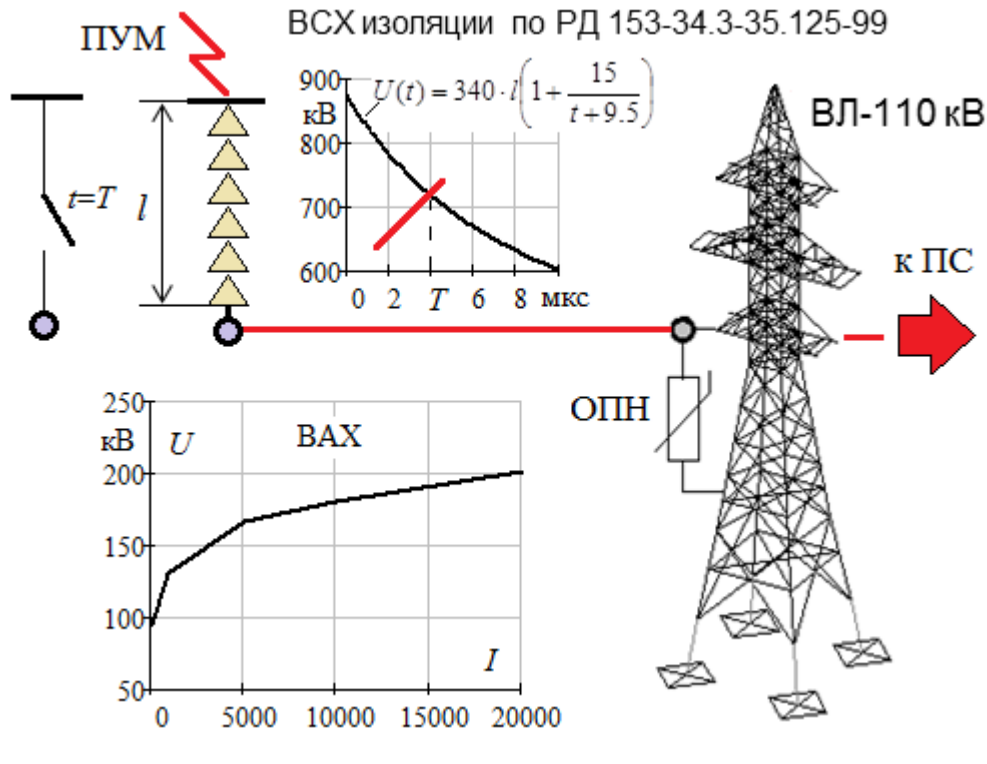
**ВНИИЭ**

$$C_c(u) = C_0 \cdot 4/3 \cdot B (u/U_0)^{1/3}, B_- = 0.85, B_+ = 1.02$$

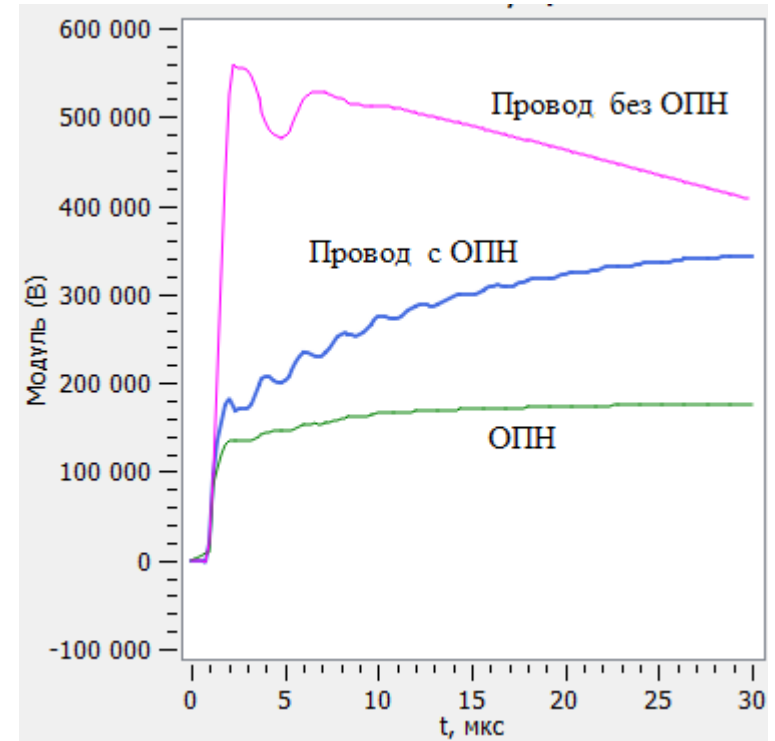
**Сравнение с экспериментами** А.К.Потужного и С.М.Фертика (Электричество, 1938, №1).  
ВЛ длиной 7.7 км, медный провод 50 мм<sup>2</sup>. Импульс 500 кВ, 1.5/40 мкс



# Моделирование изоляции и ОПН

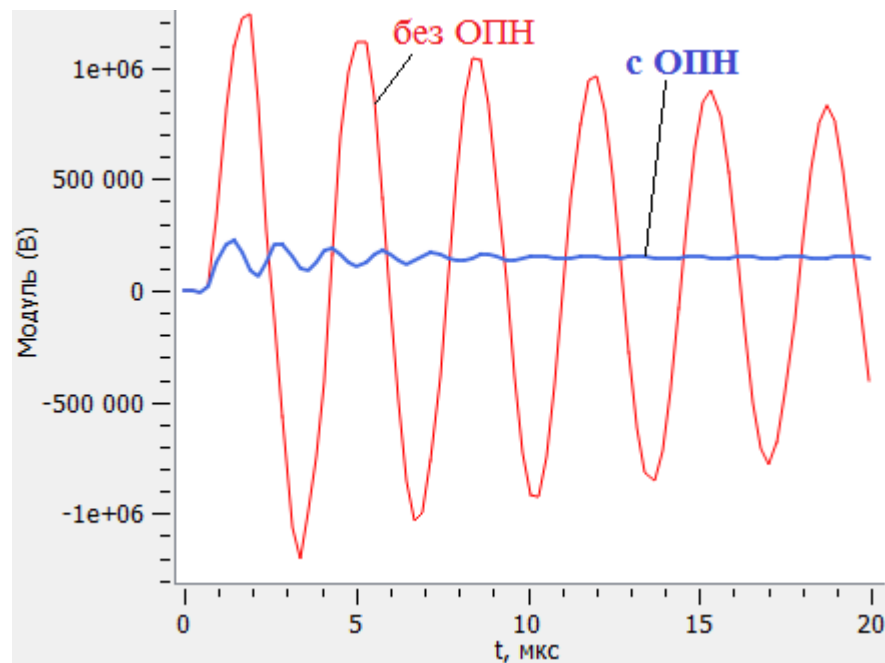
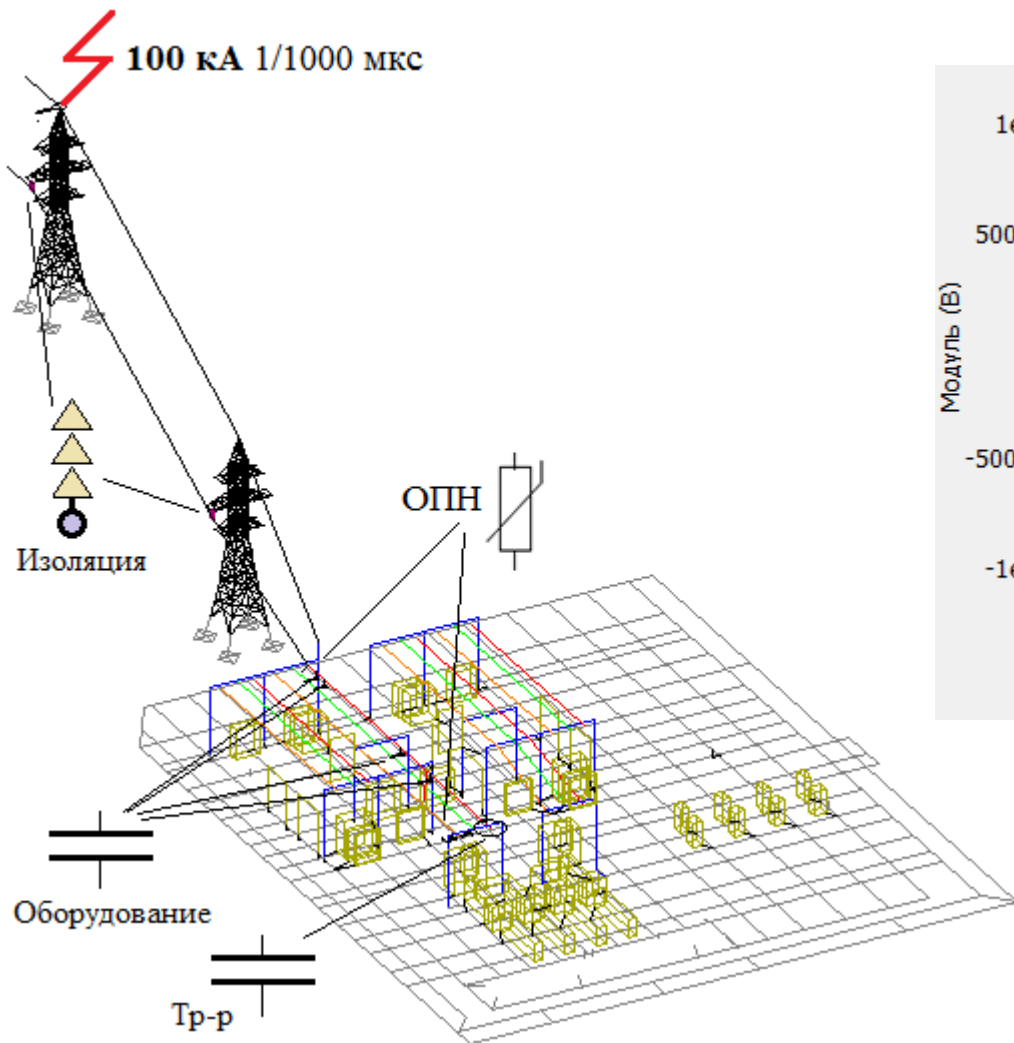


Импульс 1.2/50 мкс



**Вывод.** ОПН существенно снижает перенапряжение при близком к ПС ударе молнии. Напряжение провода больше остающегося напряжения ОПН на величину напряжения заземлителя опоры

# Грозовое перенапряжение на силовом трансформаторе ПС



Автоматически учитываются все электромагнитные связи между элементами модели. Оборудование моделируется входными емкостями

**Вывод:** Моделирование грозовых перенапряжений производится на 3D модели ВЛ и ПС.. ОПН существенно снижает перенапряжение на трансформаторе.

**Выводы:** Волновые процессы в линиях при ударах молнии моделируются в программе ЗУМ.

**СПАСИБО за внимание**