



VI РОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПО МОЛНИЕЗАЩИТЕ

17–19 апреля, 2018. Санкт-Петербург

3D МОДЕЛИРОВАНИЕ ГРОЗОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОДСТАНЦИЙ

Шишигин Д.С., Шишигин С.Л.

shishigind@yandex.ru

Вологодский государственный университет,

ООО «ЗУМ» zym-emc.ru

Задача: Рассчитать волновые процессы в воздушной линии (ВЛ) и электрической подстанции (ПС) при ударе молнии в ВЛ вблизи ПС.

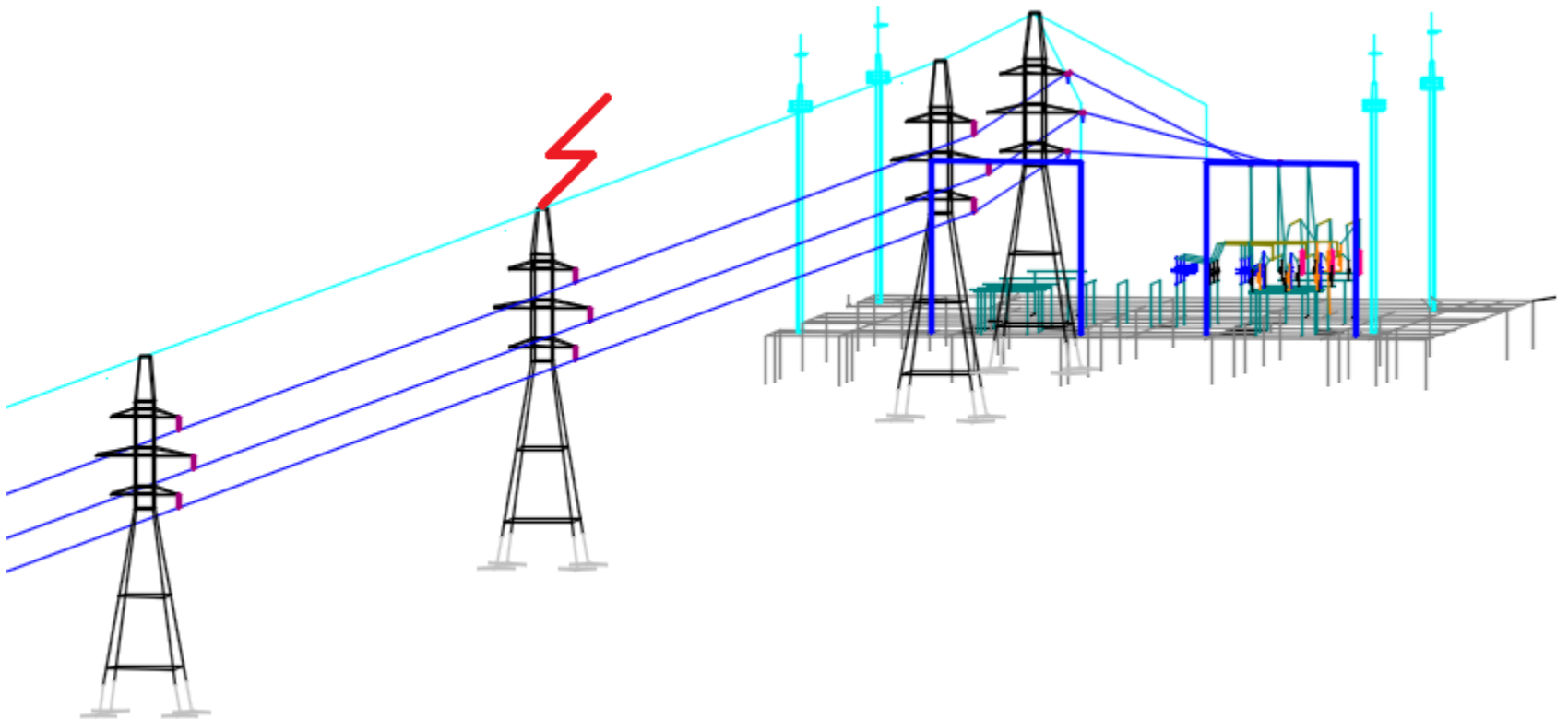
Стандартный подход: Теория длинных линий и программа EMTP.

Недостаток: Упрощенные модели заземлителей.

Альтернатива: Теория электромагнитного поля и программа FDTD.

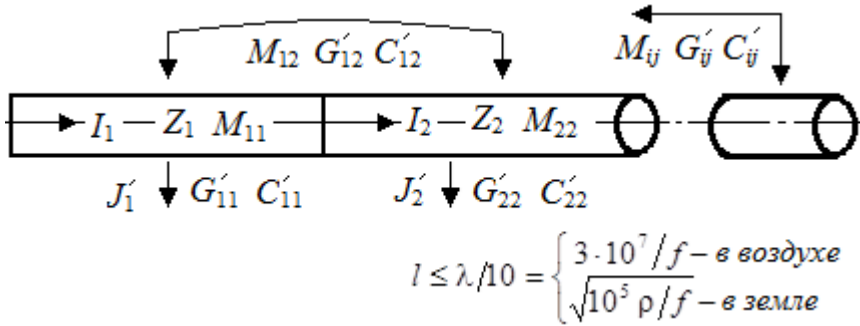
Недостаток: Слишком высокая трудоемкость.

Предлагается: Теория заземлителей и программа ЗУМ. Единая 3D модель ВЛ и ПС. Проводники в земле и воздухе.

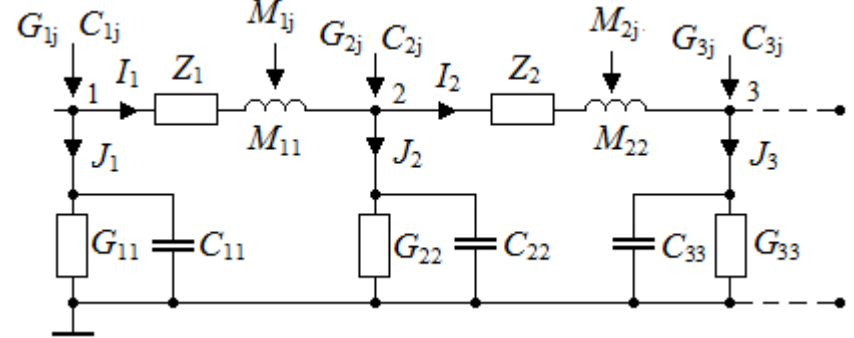


Цепно-полевая модель заземлителя (тонкого проводника)

Полевая 3D модель



Цепная модель



1) Расчет матриц **G, M, C**

2) Автоматическое построение цепной модели

3) Расчет **$u(t), i(t)$** при заданном импульсе тока молнии

4) Расчет **ϕ, E, H** (при известных продольных и стекающих токах)

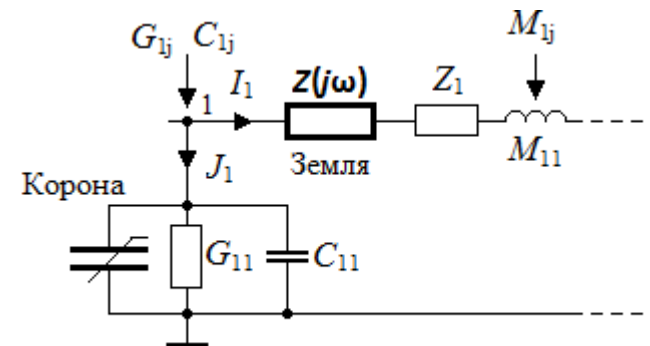
Что добавить в задачах грозозащиты

Сопротивление земли (Аппроксимация формулы Карсона)

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

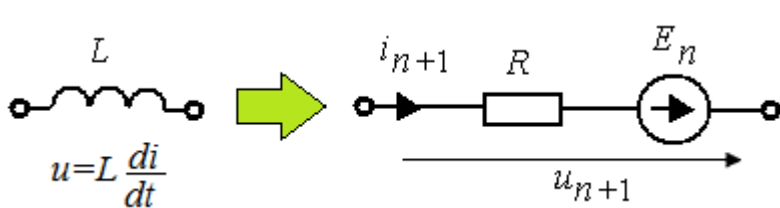
Модель короны по ВНИИЭ

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

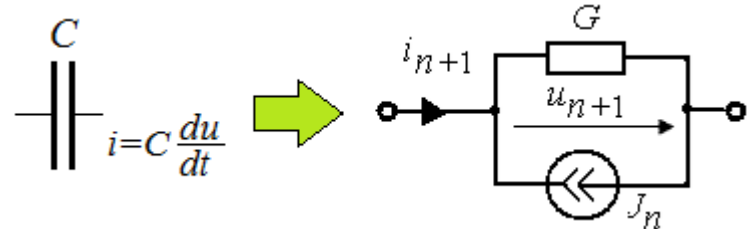


Метод дискретных резистивных схем с формулой трапеций

Замена индуктивностей и емкостей резистивными схемами на n -м временном шаге длиной h с использованием формулы Эйлера или трапеций



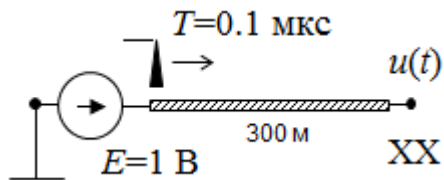
$$R = 2L/h; \quad E_k = Ri_k + u_k$$



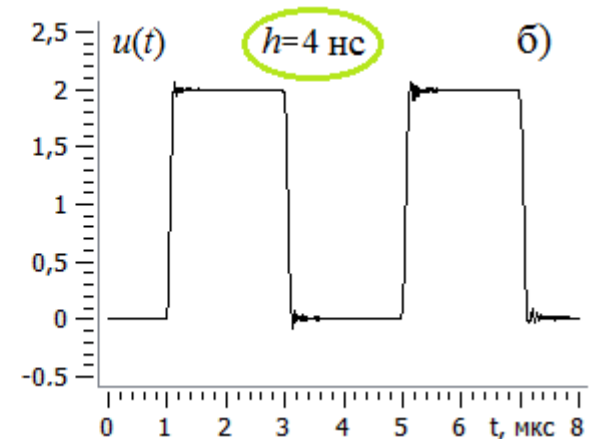
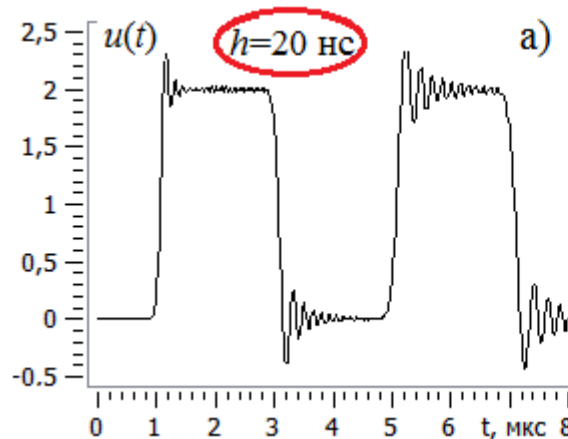
$$G = 2C/h; \quad J_k = Gu_k + i_k$$

Свойства формулы трапеций (по Э.Хайнеру и Г.Ваннеру): А-устойчивость, **L-неустойчивость**

$x' = \lambda x \Rightarrow x_{k+1} = R(z)x_k, \quad R(z) = \frac{1-z/2}{1+z/2}, \quad z = \lambda h \Rightarrow$ При $|z| > 2$ возникают колебания

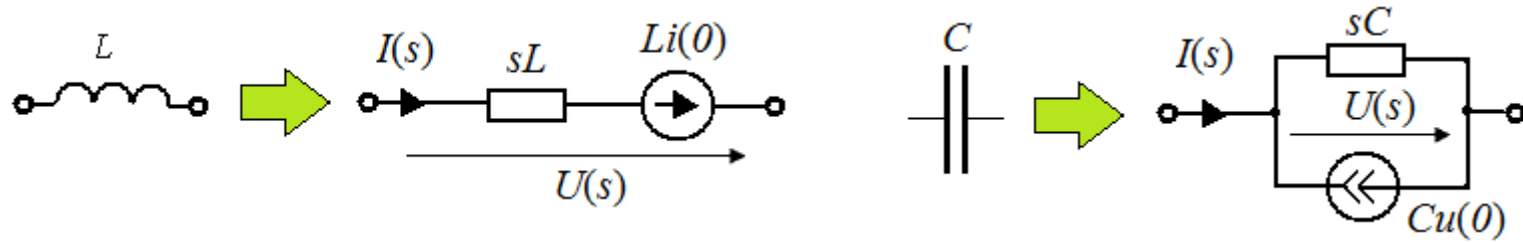


Напряжение в конце линии без потерь длиной 300 м при воздействии импульса напряжения амплитудой 1 В с линейным фронтом длительностью 0.1 мкс



Вывод: есть вероятность возникновения ложных высокочастотных колебаний при использовании формулы трапеций в жестких задачах.

Метод Влаха. Численный метод обратного преобразования Лапласа



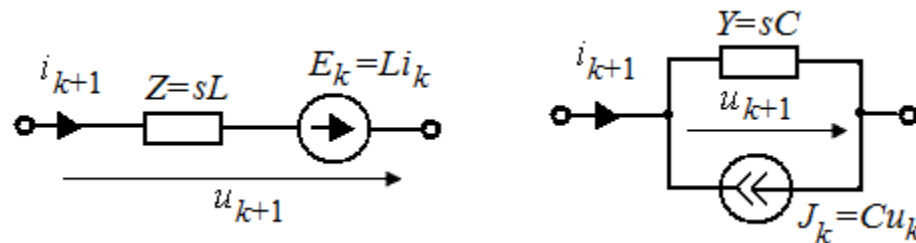
Семейство формул Влаха
(А и L устойчивы)

$$f(t) = \frac{1}{t} \sum_i \operatorname{Re} [res_i F(s_i / t)], \quad t > 0$$

Шаговые алгоритмы на основе формул Влаха 3 порядка

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

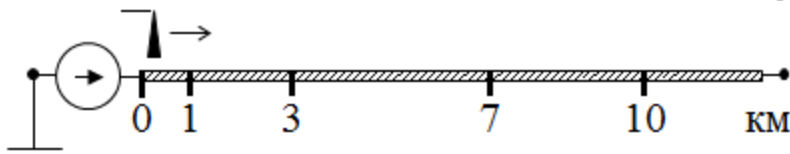
Достоинства: А и L **устойчивость** и на **порядок точнее** формулы трапеций.



Реализация: дискретные схемы, как в МДС, но с комплексными параметрами

Влияние короны на волны перенапряжения в линиях

$$u(t) = U_m \left[0.988e^{-0.123t} - 1.064e^{-4.1t} \sin(12.3t + 70^\circ) \right], \quad U_m = 850 \cdot 10^3, \quad t \text{ [мкс]}$$



1. Данные измерений С. Gary

в полевых условиях

2. Расчеты в EMTP RV с

использованием модели

короны **Suliciu** согласуются с измерениями.

Модель Suliciu итерационная

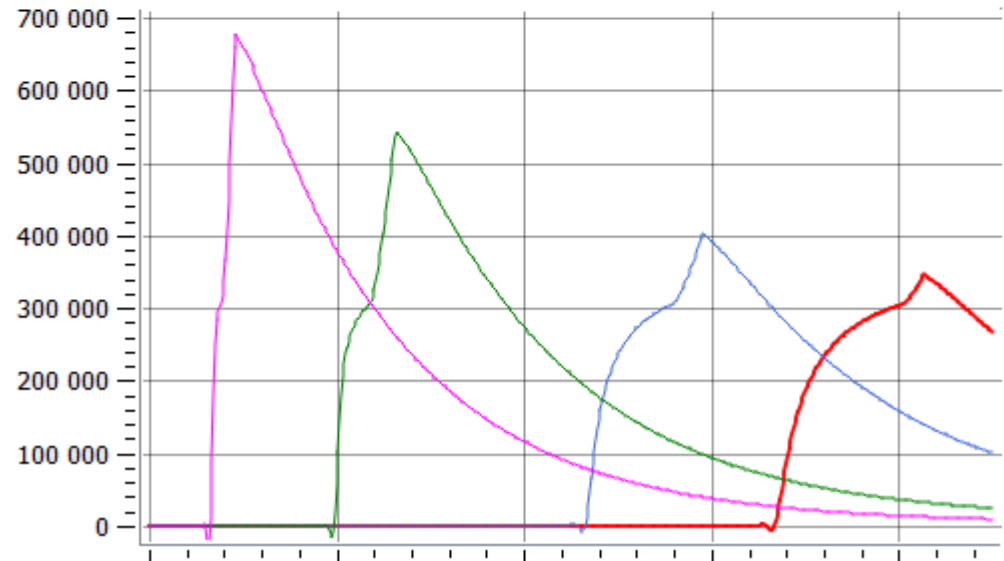
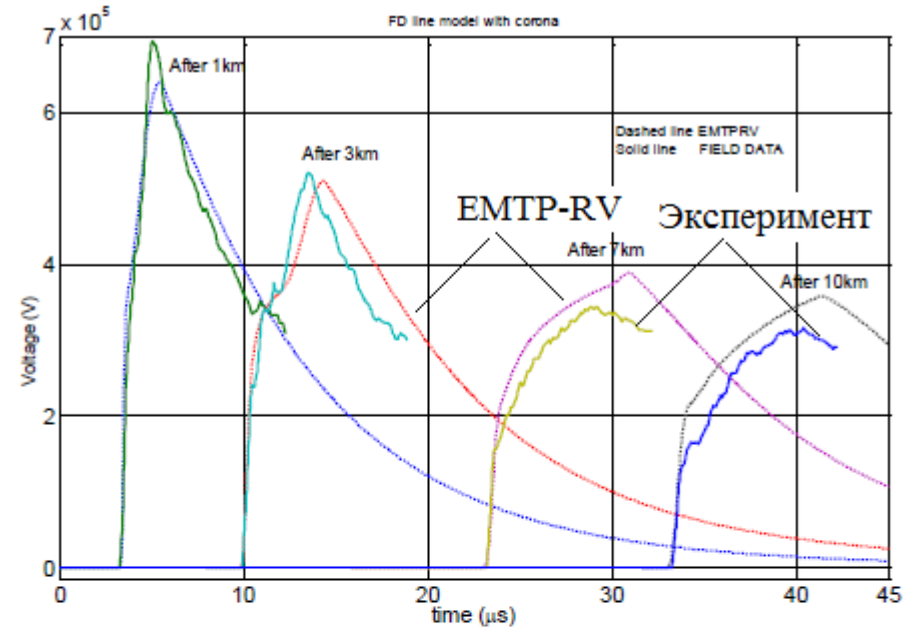
на каждом временном шаге

Расчеты по программе ЗУМ с

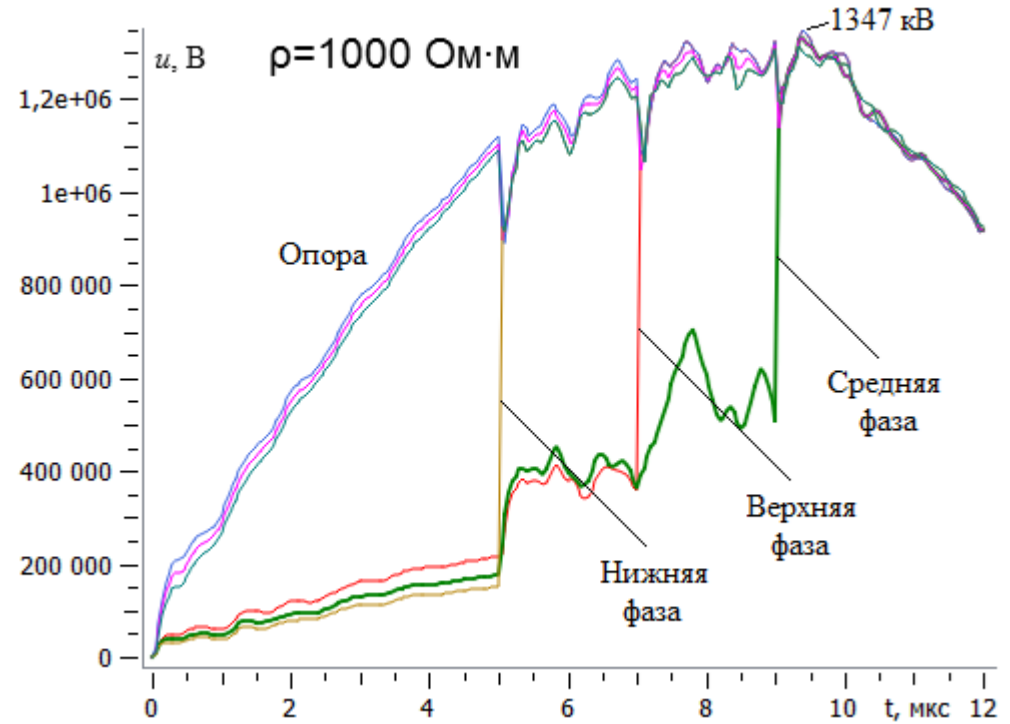
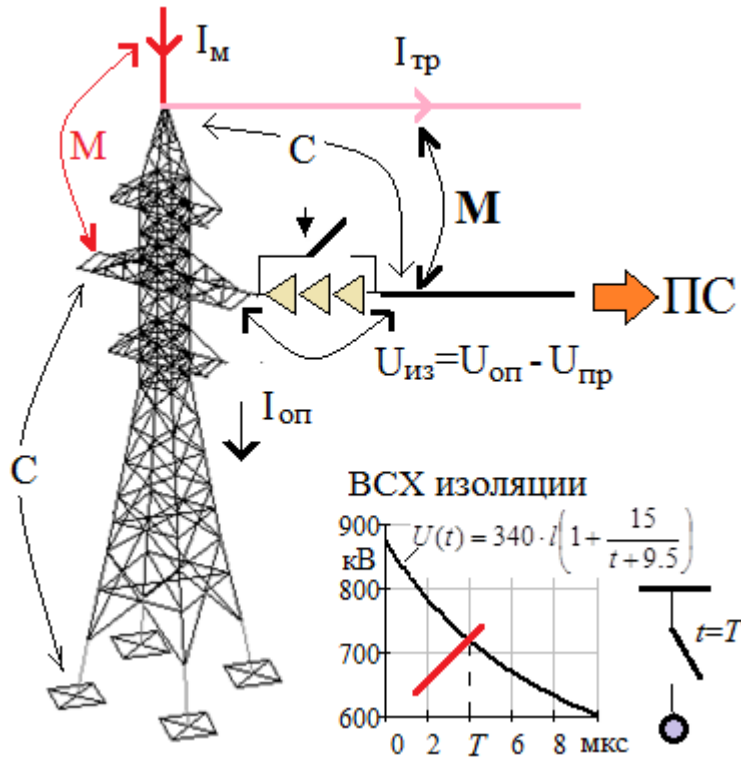
моделью короны **ВНИИЭ**

согласуются с измерениями.

Модель ВНИИЭ без итераций на шаге.

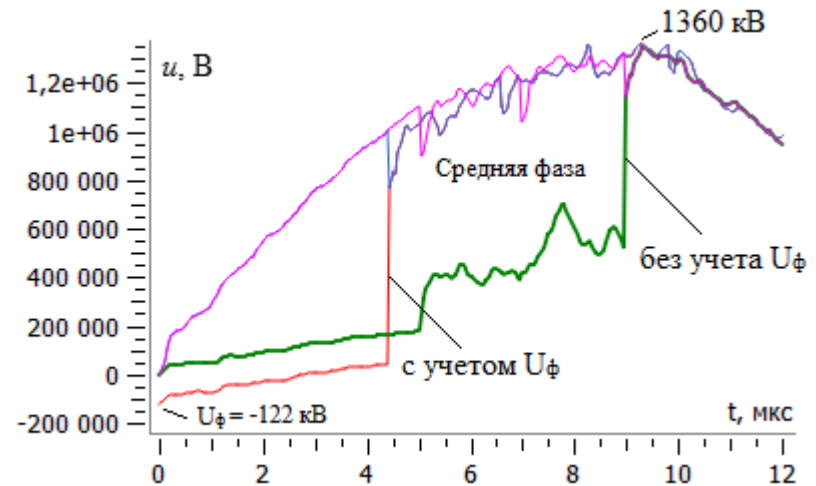


Прямой удар молнии в опору. Обратное перекрытие изоляции

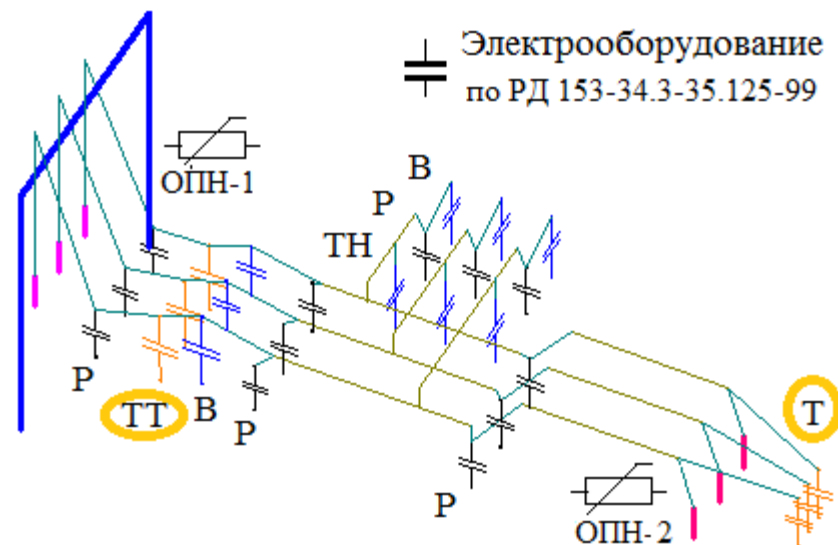
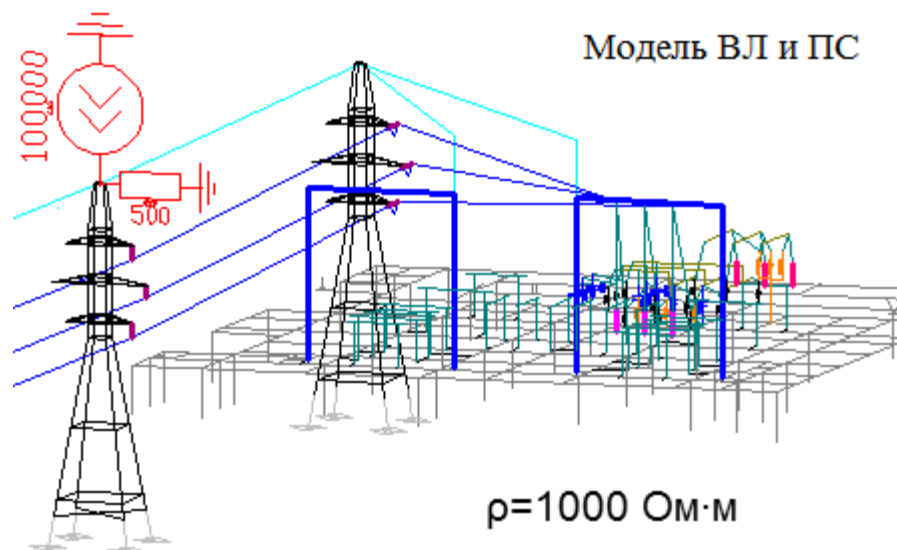


Выводы:

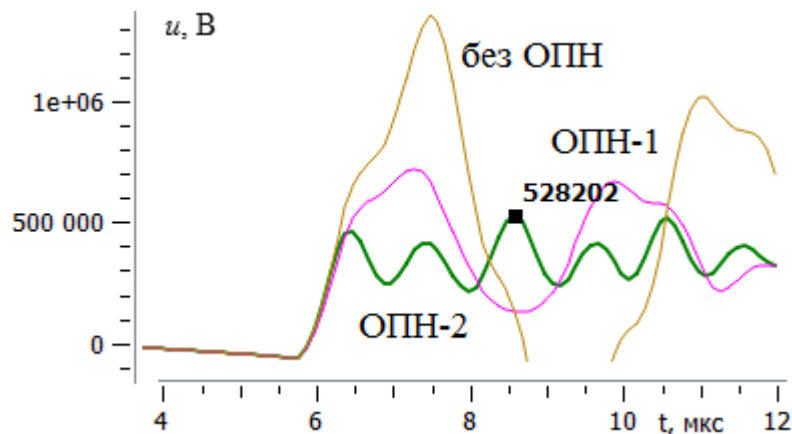
- При обратном перекрытии изоляции на проводе возникает **волна перенапряжения с коротким фронтом независимо от длительности тока молнии;**
- **В высокоомном грунте** первой перекрывается изоляция **нижней фазы** (без учета фазного напряжения ВЛ).
- Амплитуда волны от фазного напряжения не зависит



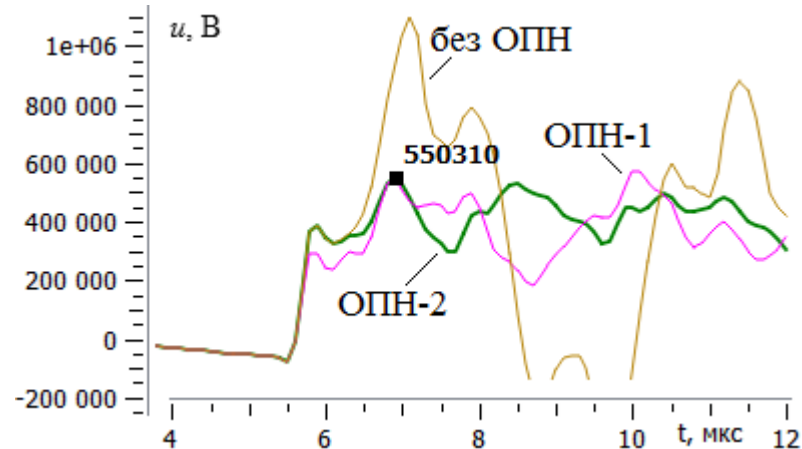
Молниезащита ПС от набегающих волн грозовых перенапряжений



Перенапряжение трансформатора тока (ТТ)

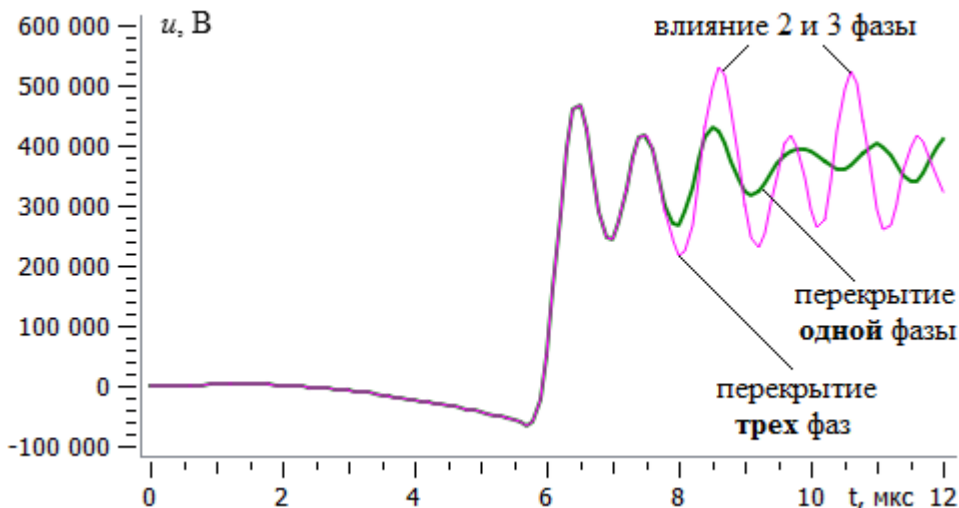


Перенапряжение силового трансформатора (Т)



Вывод: Установка ОПН наиболее эффективна у силового трансформатора (Т).
ОПН у портала менее эффективен.

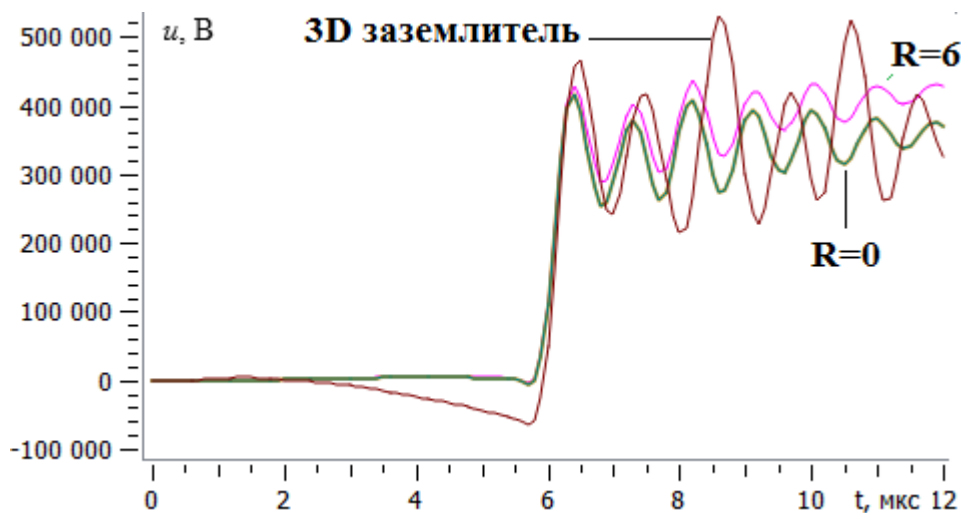
Напряжение на трансформаторе при перекрытии на опоре одной и трех фаз



Установлено:

- При перекрытии трех фаз возникают два новых максимума перенапряжения в момент прихода волн перенапряжения двух других фаз.

Расчеты без 3D заземлителя ПС (как в ЕМТР)



Установлено:

- С 3D заземлителем начальные условия ненулевые (снижение первого максимума);
- 3D заземлитель ПС усиливает колебательные процессы и максимум перенапряжения;
- Заземлитель при упрощенном моделировании следует описывать статическим сопротивлением (для корректной величины остающегося напряжения ОПН).

Выводы:

- **В высокоомном грунте ($\rho > 1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) заземлители оказывают существенное влияние на результаты расчета грозовых перенапряжений, поэтому переход к единой 3D модели проводников, расположенных в воздухе и земле, повышает адекватность расчетов.**
- Рассматривая проводник в воздухе частным случаем проводника в земле, теория заземлителей дает апробированные модели, методы и программы для решения задач грозозащиты и подобных задач.

СПАСИБО за внимание