

# Заземляющие устройства электроустановок

Лекция № 5

по курсу

Электромагнитная совместимость  
в электроэнергетике

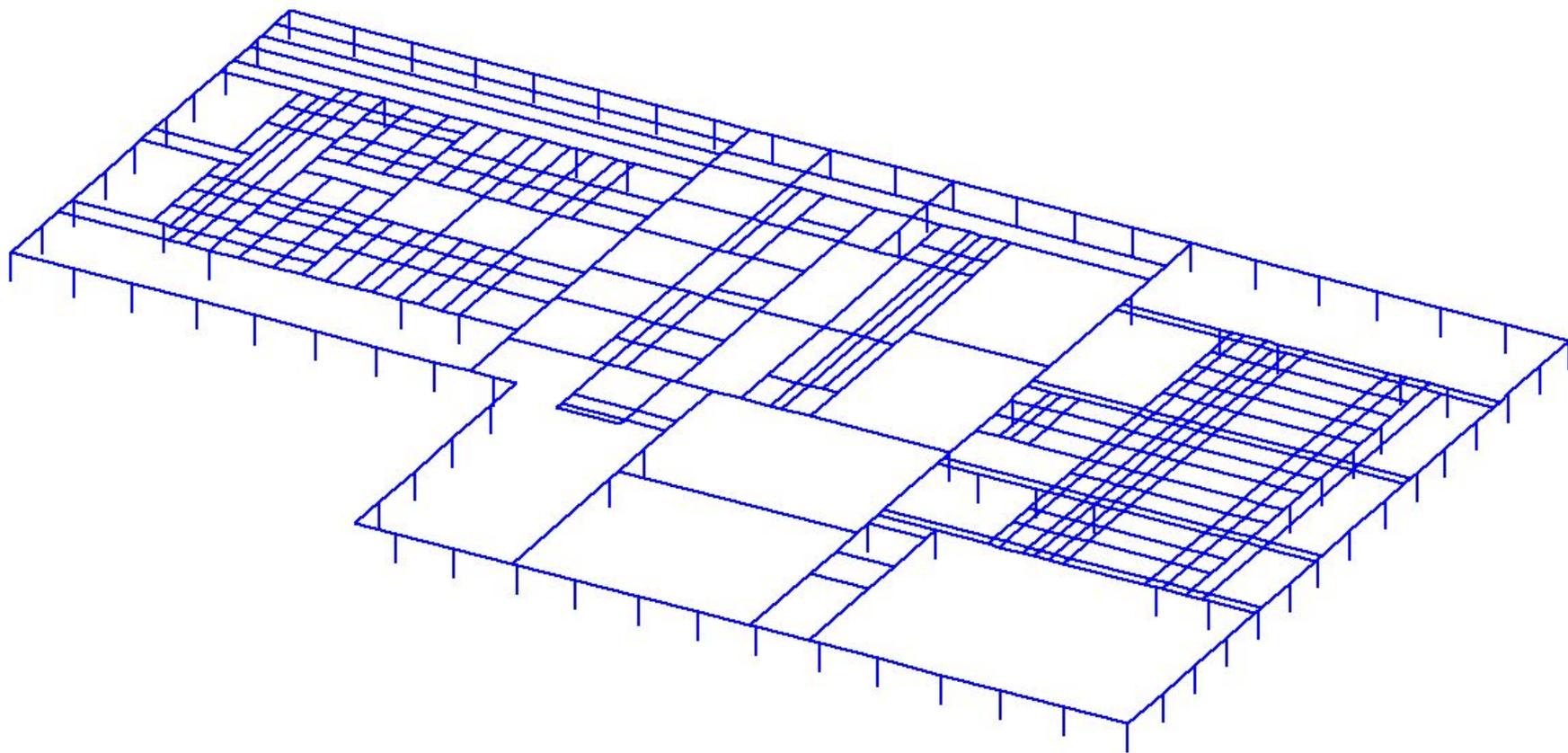
*Нестеров С.В.*

## Определения

(из Правил устройства электроустановок)

- 1.7.19. **Заземляющее устройство (ЗУ)** - совокупность заземлителя и заземляющих проводников.
- 1.7.15. **Заземлитель** - проводящая часть или совокупность соединенных между собой проводящих частей, находящихся в электрическом контакте с землей непосредственно или через промежуточную проводящую среду.
- 1.7.18. **Заземляющий проводник** - проводник, соединяющий заземляемую часть (точку) с заземлителем.

# Заземляющее устройство подстанции 220/110 кВ



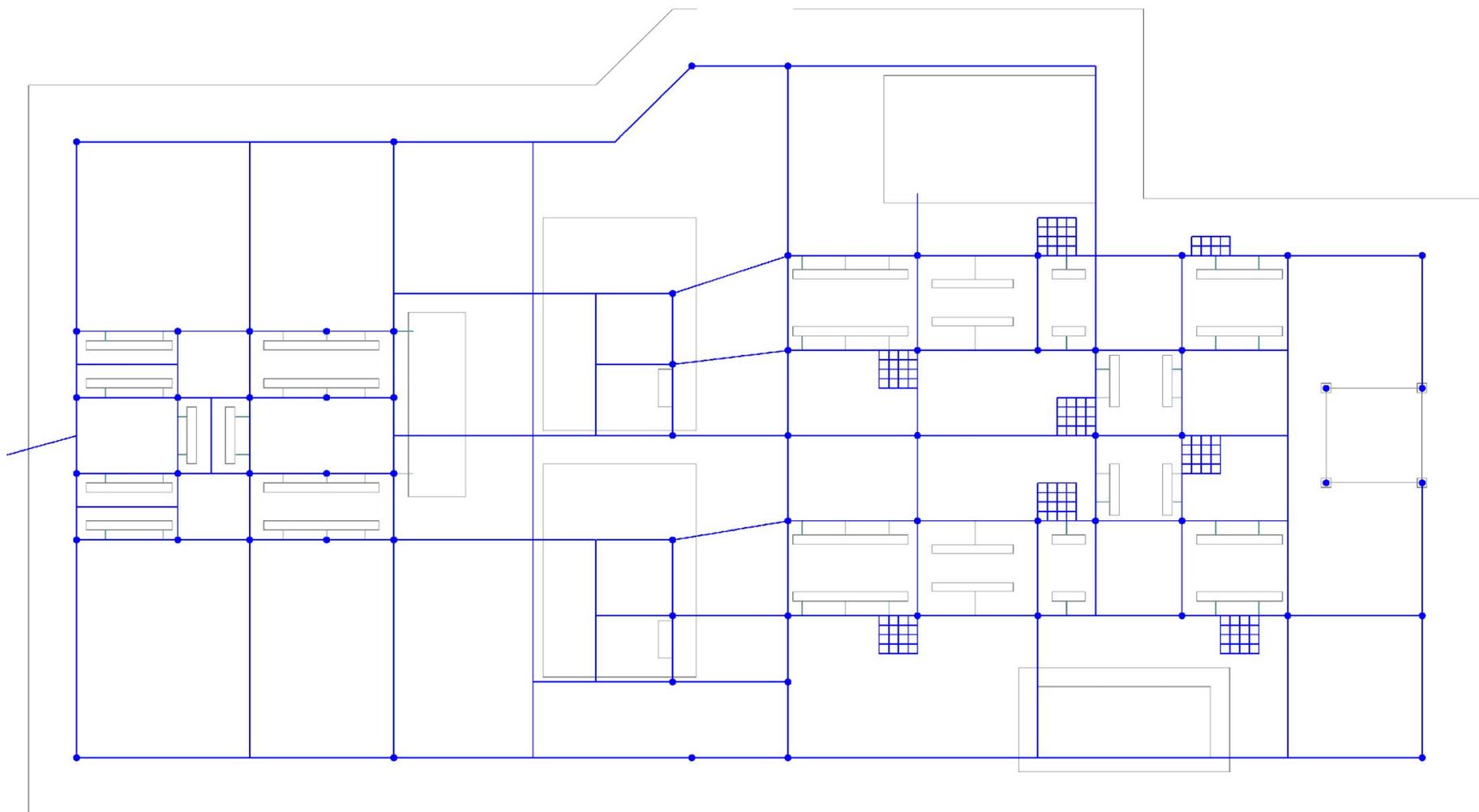
Выполнено: горизонтальные элементы ЗУ – полосовая сталь 40x4 мм<sup>2</sup>

Вертикальные электроды – круглая сталь диаметром 12 мм

Глубина расположения горизонтальных элементов – 0,5 м

- **Искусственный заземлитель** - заземлитель, специально выполняемый для целей заземления.
- **Естественный заземлитель** - сторонняя проводящая часть, находящаяся в электрическом контакте с землей непосредственно или через промежуточную проводящую среду, используемая для целей заземления.

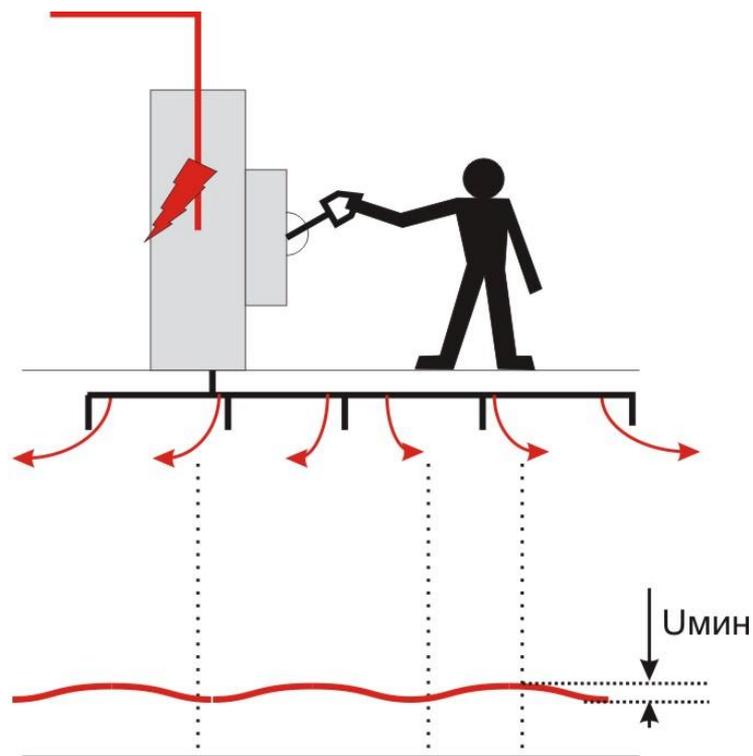
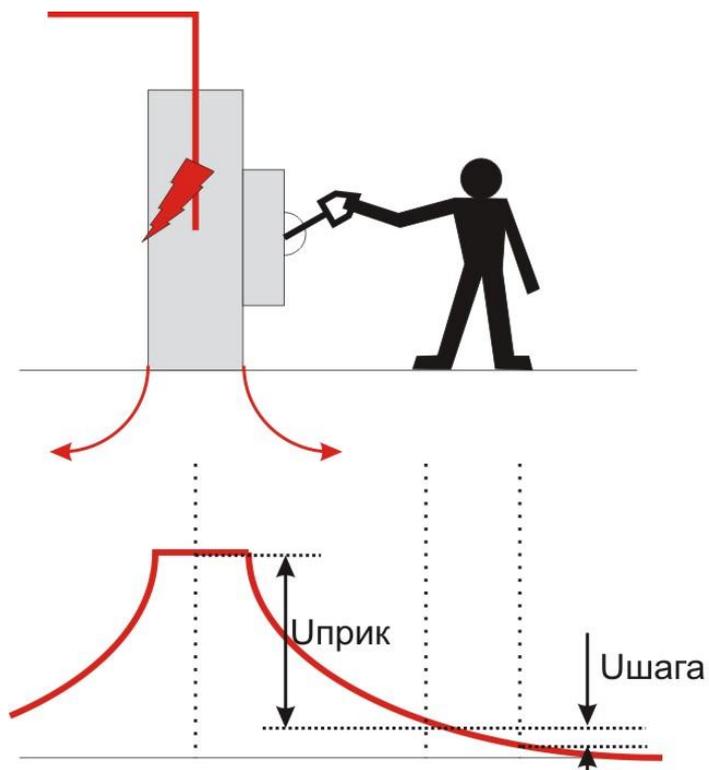
# Заземляющее устройство подстанции 110/35/6 кВ



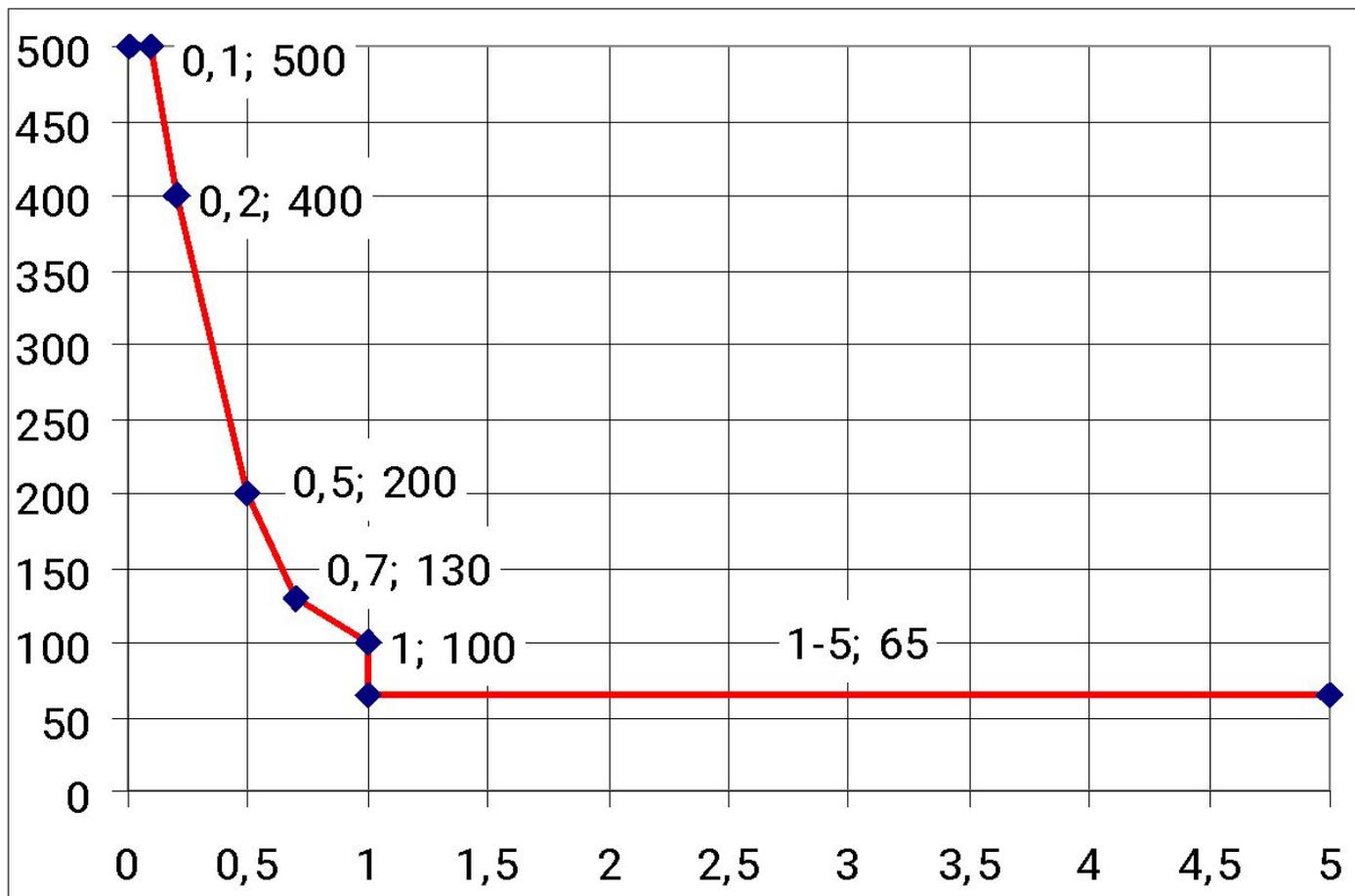
# Назначение заземляющего устройства электроустановок высокого напряжения

1. Обеспечение безопасной работы обслуживающего персонала – выравнивание потенциалов
2. Обеспечение действия релейных защит от замыканий
3. Рабочее заземление нейтралей электрических сетей
4. Обеспечение допустимых напряжений на изоляции вторичного оборудования – выравнивание потенциалов
5. Отвод в землю токов при работе средств молниезащиты и устройств защиты от перенапряжений
6. Снижение высокочастотных помех и помех промышленной частоты, воздействующих на устройства связи, релейной защиты и автоматики
7. Защита от статического электричества

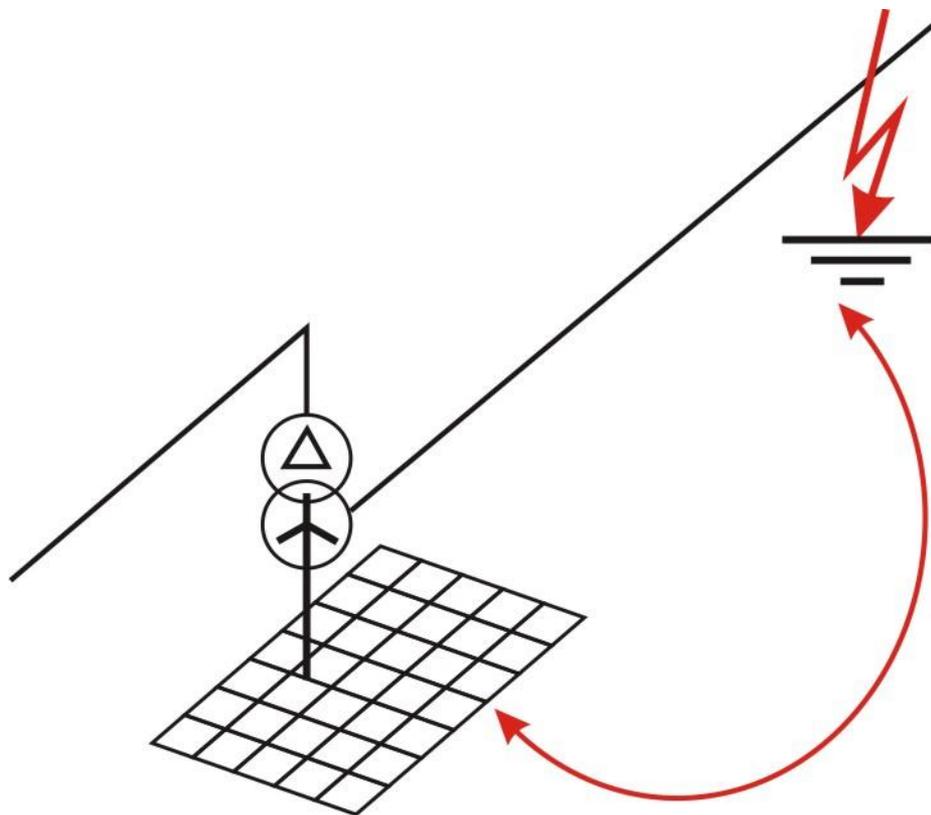
# Выравнивание потенциалов на территории электроустановки для снижения напряжений прикосновения и шага



# Зависимость допустимого напряжения прикосновения от времени воздействия (ГОСТ 12.1.038)



## Возникновение потенцилоповышающего тока при замыкании на землю в сети



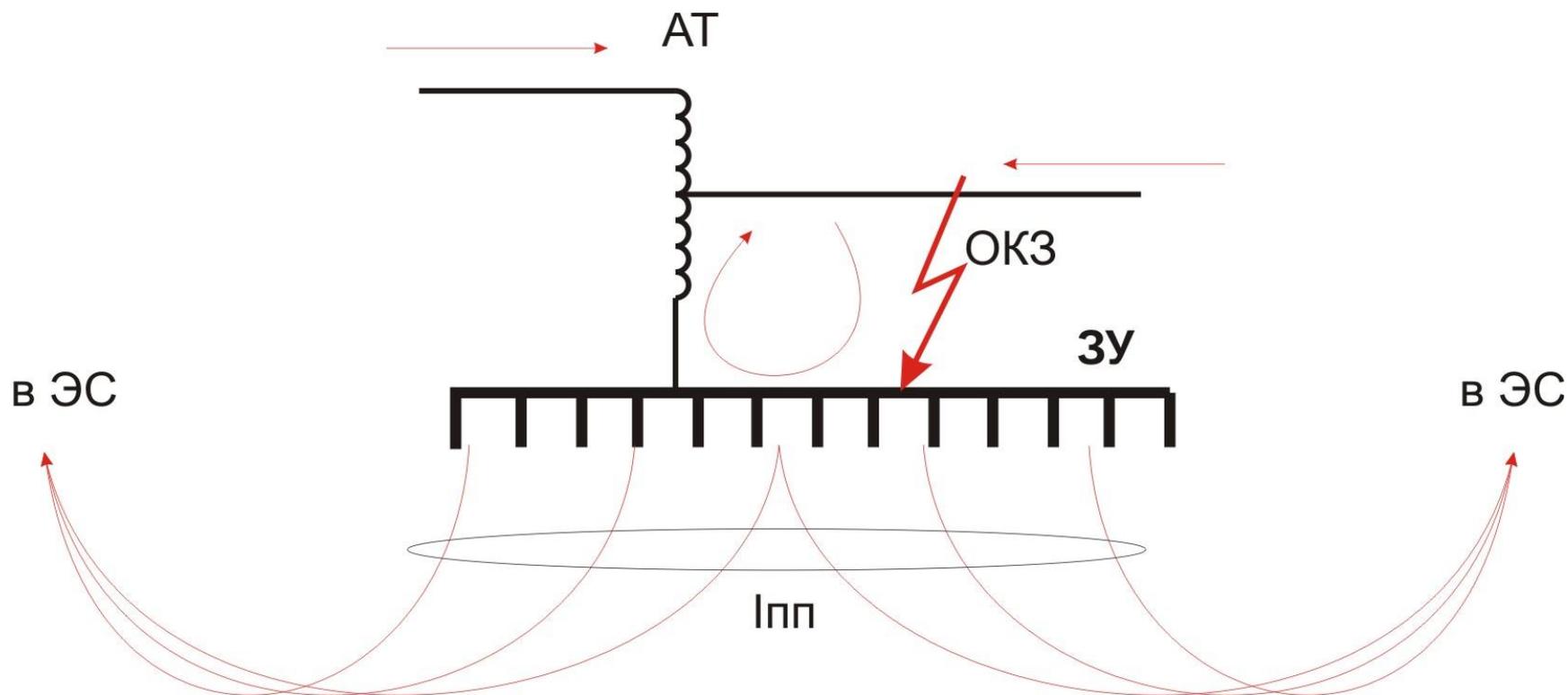
## Потенциал на ЗУ, вынос потенциала

- При стекании тока с ЗУ на нем возникает потенциал
$$U_{зу} = I_{пп} \times R_{зу},$$

где  $I_{пп}$  – потенциалоповышающий ток (стекающий с ЗУ в энергосистему),  $R_{зу}$  – сопротивление ЗУ в месте ввода тока

- Возникающий потенциал прикладывается к изоляции кабелей, заходящих на территорию электроустановки из зоны меньшего потенциала
- Возникающий на ЗУ потенциал может быть вынесен с территории электроустановки заземленными на ней коммуникациями (кабели, изолированные трубопроводы и т.п.)

# Работа ЗУ при несимметричных КЗ



# Неэквипотенциальность ЗУ

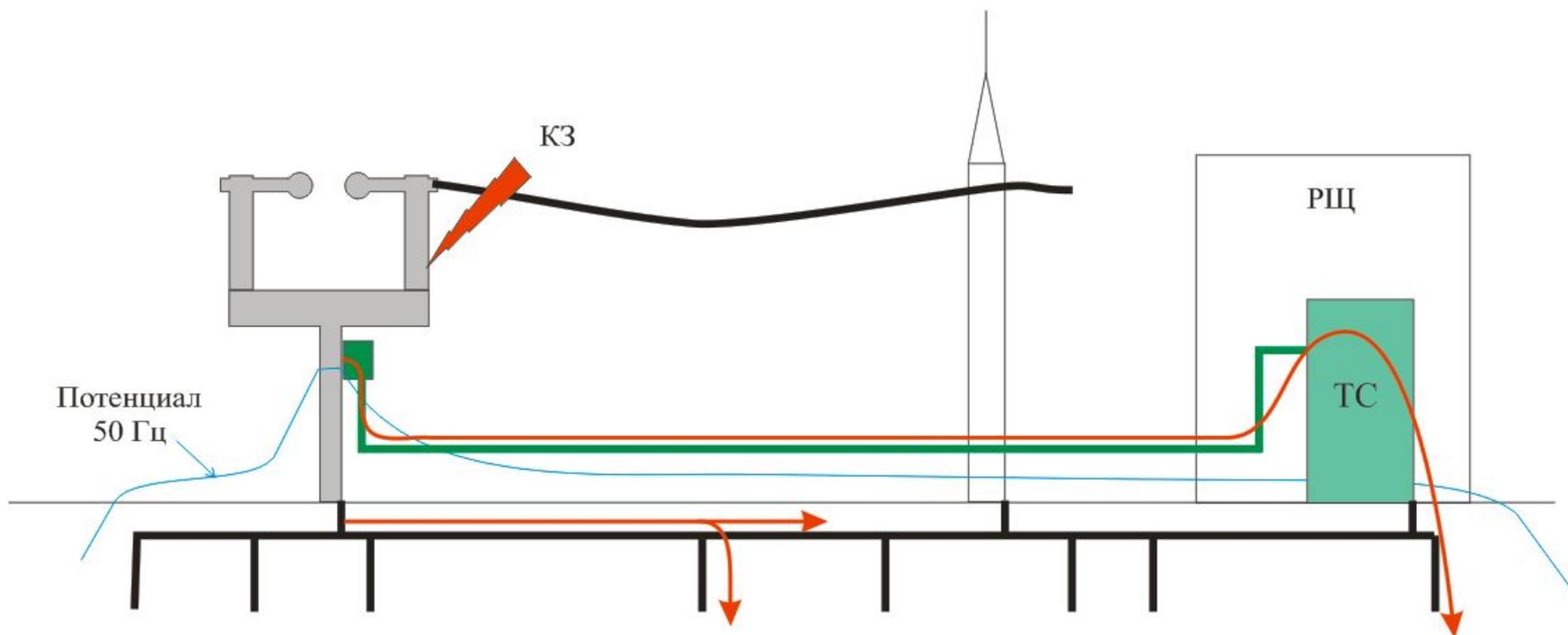
Неэквипотенциальность ЗУ – наличие разных потенциалов в разных точках одного ЗУ.

## ПРИЧИНА ВОЗНИКНОВЕНИЯ

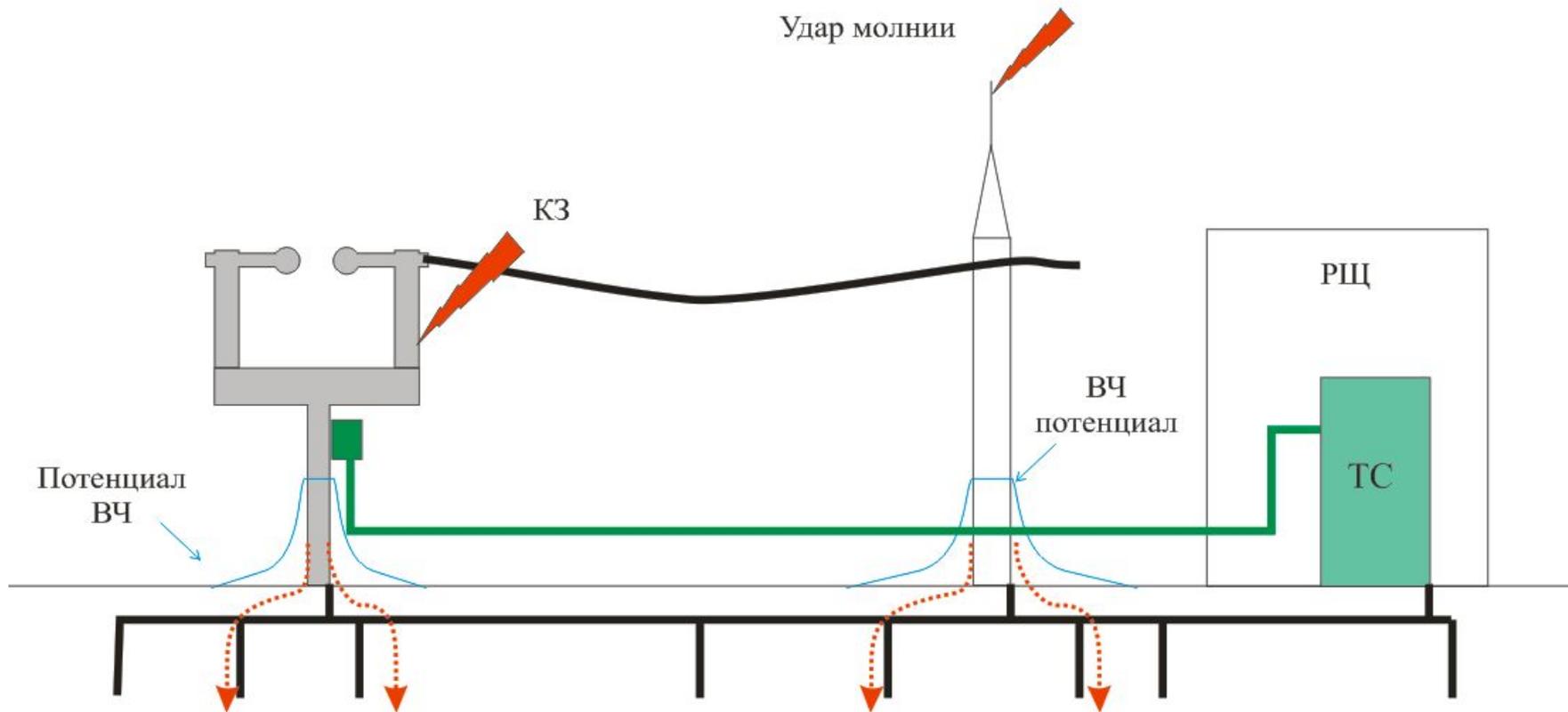
- Элементы заземляющего устройства обладают продольным сопротивлением, зависящим от частоты и величины тока
- Ток, протекая по элементам ЗУ, создает на нем перепады потенциалов
- Степень неэквипотенциальности зависит от параметров элементов ЗУ, их конфигурации, удельного сопротивления грунта, частоты тока

## ПОСЛЕДСТВИЯ

- Возникающие разности потенциалов прикладываются к изоляции кабелей вторичных цепей, к изоляции гальваноразвязки устройств РЗиА
- Возникающие разности потенциалов по ЗУ приводят к протеканию нежелательных токов (в экранах кабелей, заземленных с двух концов; в трубопроводах; по элементам металлических ограждений и т.п.)

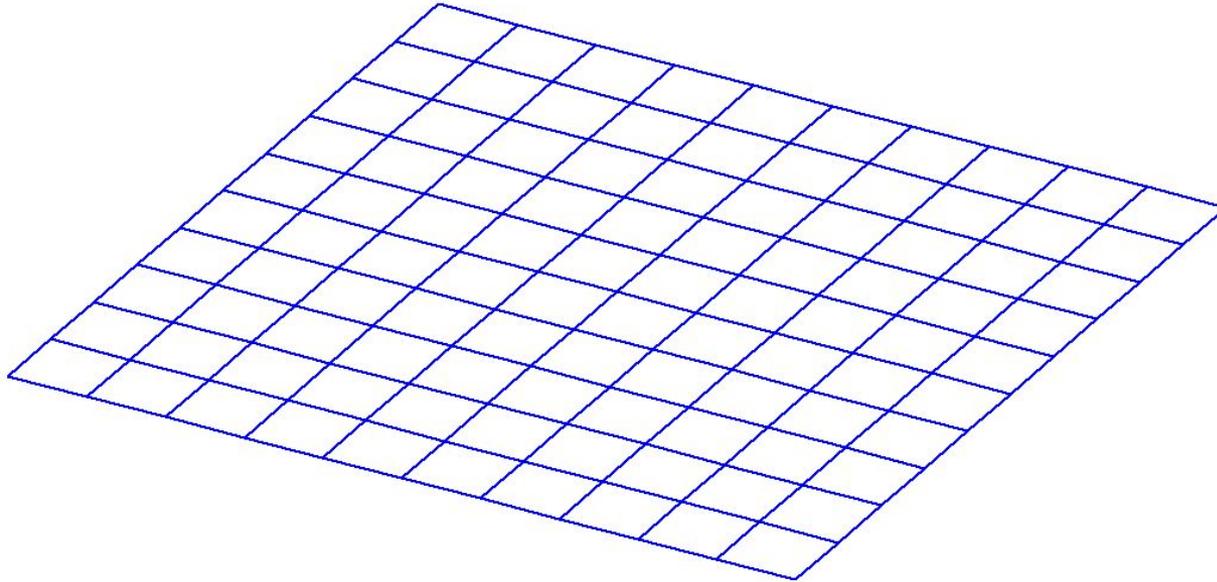


**Возникновение на ЗУ токов и напряжений промышленной частоты (зона подъема потенциала распределена по территории ЗУ)**



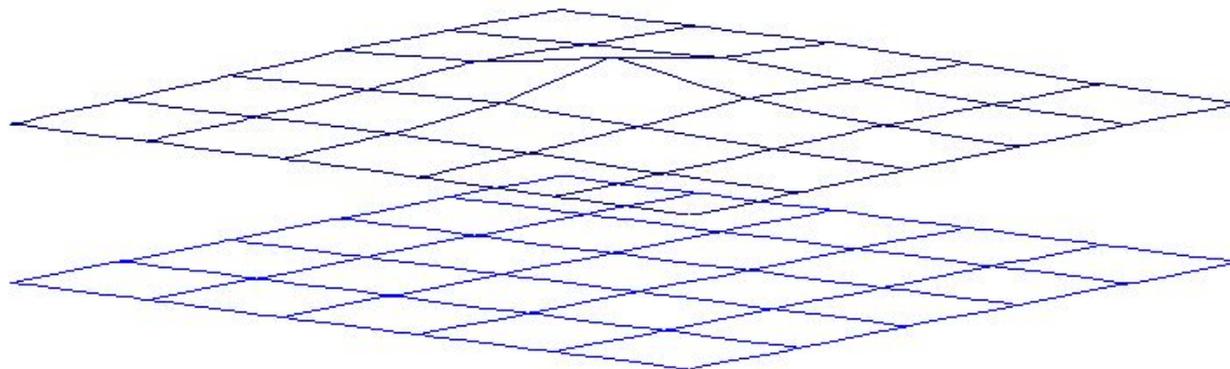
**Возникновение на ЗУ токов и напряжений высокой частоты  
(зона подъема потенциала локализована  
вокруг места ввода ВЧ тока в ЗУ)**

# Модель ЗУ для расчета неэквипотенциальности

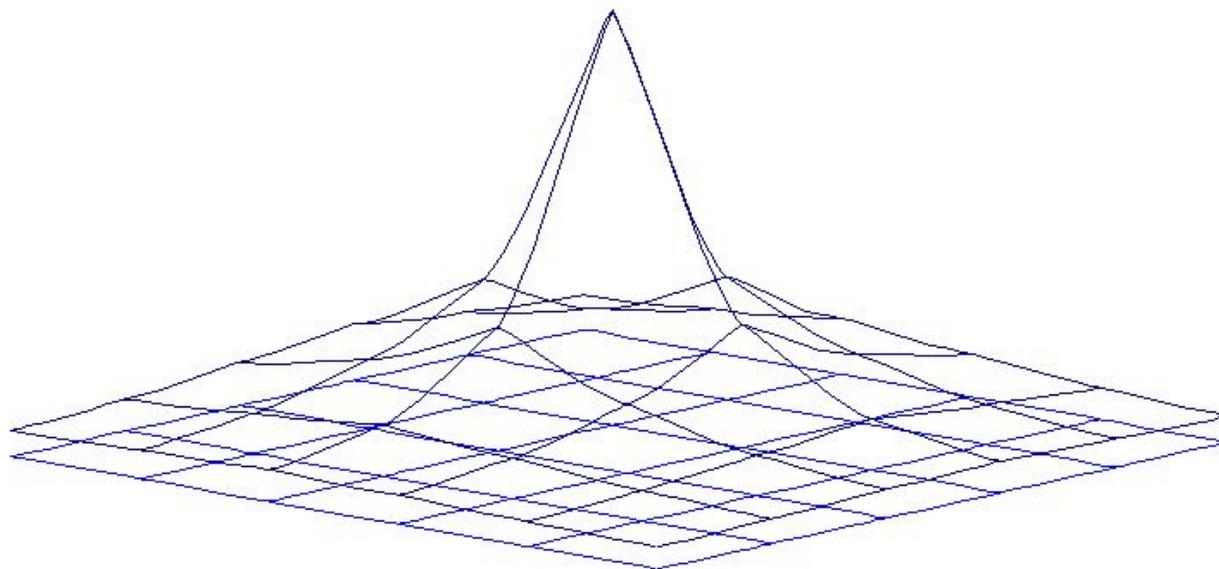


Размеры ЗУ **250 x 250 м**, шаг сетки **25 м**  
Удельное сопротивление грунта **100 Омм**  
Ток вводится в центр сетки, величина тока **10 кА**  
Частота тока **50 Гц, 1 кГц, 100 кГц**

## Распределение потенциала по ЗУ при разной частоте тока

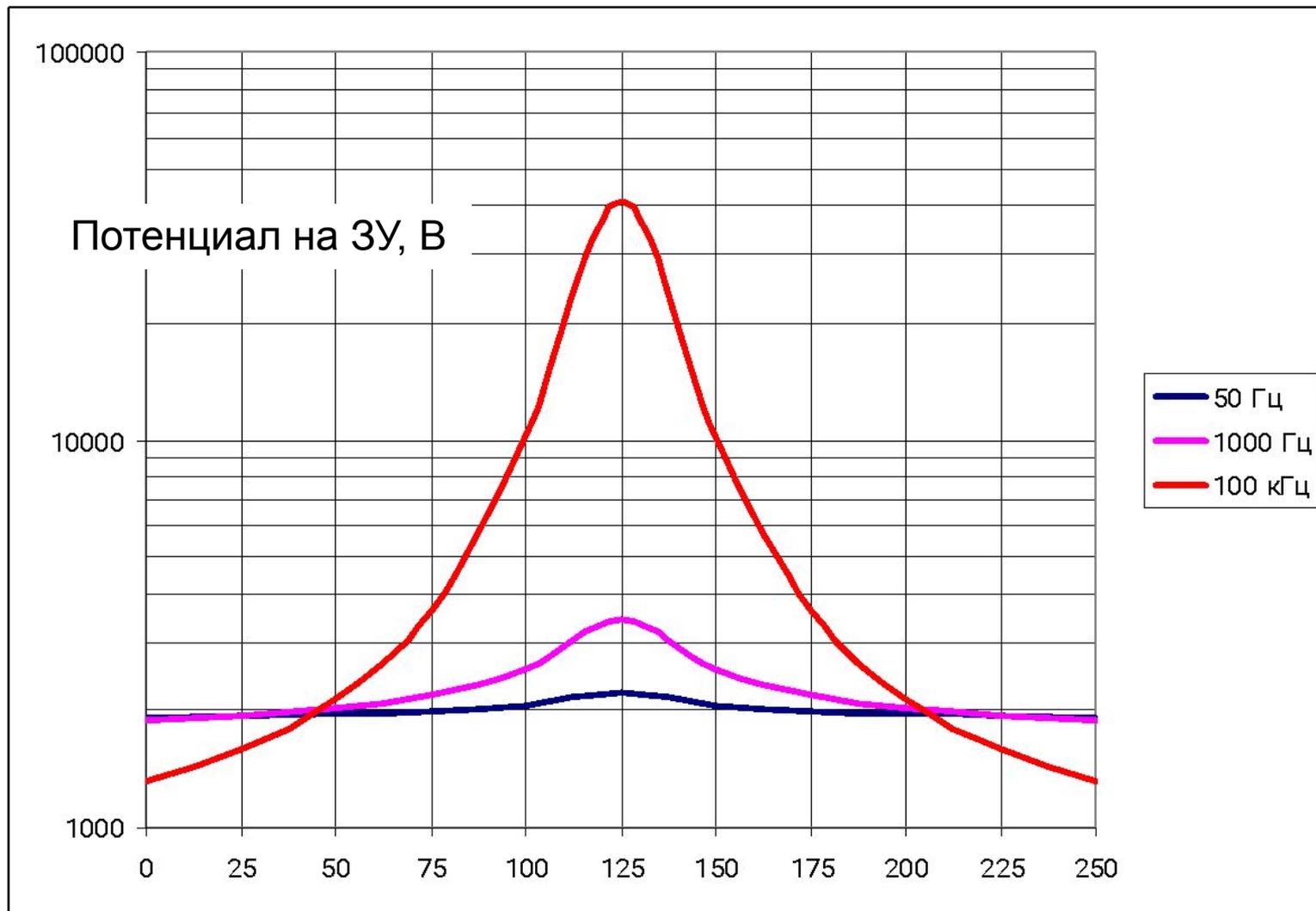


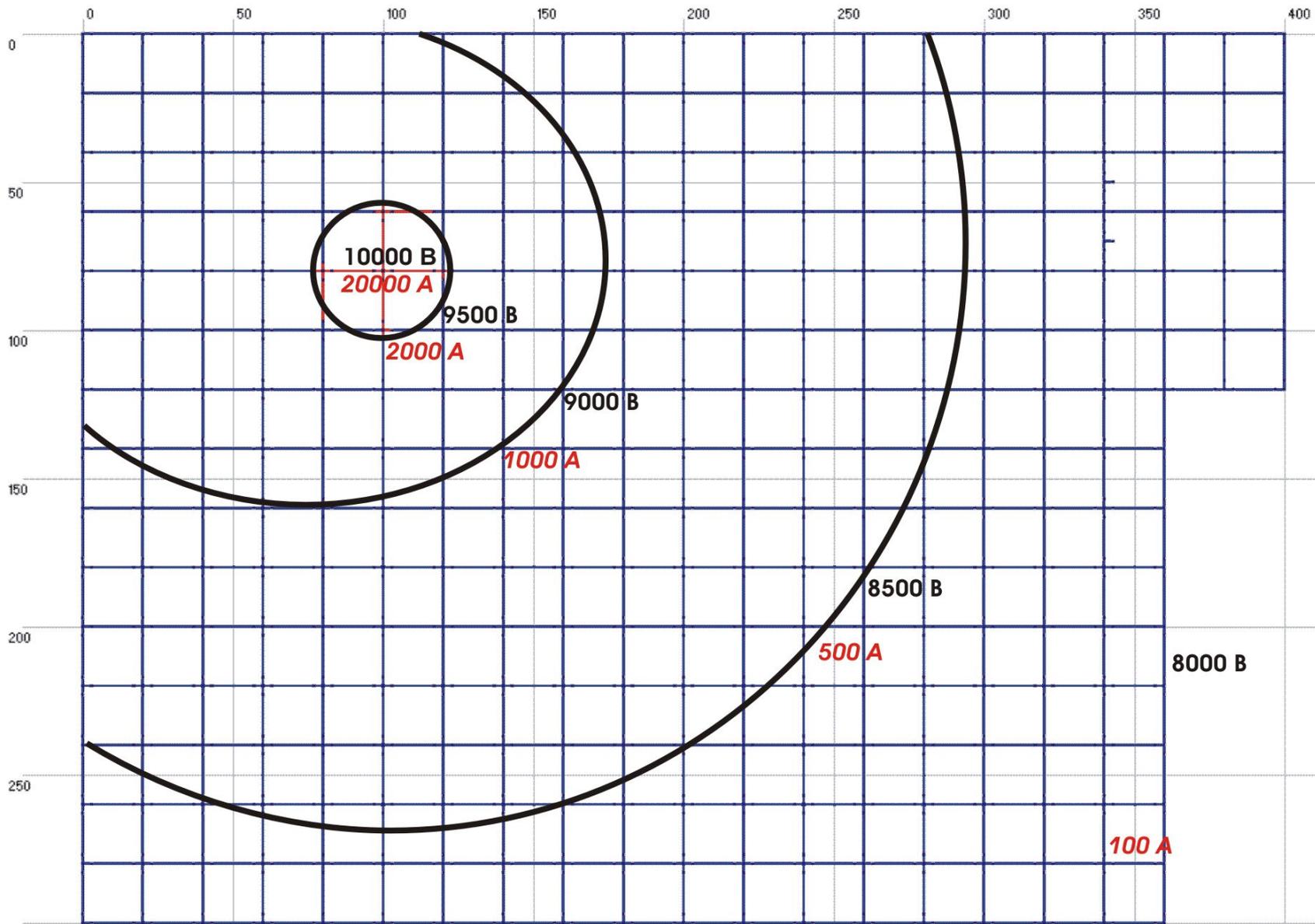
**$f = 50$  Гц**



**$F = 5$  кГц**

# Неэквипотенциальность ЗУ при разной частоте вводимого тока





**Распределение потенциалов и продольных токов ПЧ по ЗУ**

# Проектирование ЗУ

Производится в соответствии с Правилами устройства электроустановок (ПУЭ), глава 1.7

Проектируемое ЗУ электроустановок напряжением выше 1 кВ в сетях с эффективно заземленной нейтралью должно удовлетворять требованиям (некоторые параграфы ПУЭ):

**1.7.89. Напряжение на заземляющем устройстве при стекании с него тока замыкания на землю не должно, как правило, превышать 10 кВ.** Напряжение выше 10 кВ допускается на заземляющих устройствах, с которых исключен вынос потенциалов за пределы зданий и внешних ограждений электроустановок. При напряжении на заземляющем устройстве более 5 кВ должны быть предусмотрены меры по защите изоляции отходящих кабелей связи и телемеханики и по предотвращению выноса опасных потенциалов за пределы электроустановки.

## Проектирование ЗУ

**1.7.90. Заземляющее устройство, которое выполняется с соблюдением требований к его сопротивлению, должно иметь в любое время года сопротивление не более 0,5 Ом с учетом сопротивления естественных и искусственных заземлителей.**

В целях выравнивания электрического потенциала и обеспечения присоединения электрооборудования к заземлителю на территории, занятой оборудованием, следует прокладывать продольные и поперечные горизонтальные заземлители и объединять их между собой в заземляющую сетку.

**1.7.91. Заземляющее устройство, которое выполняется с соблюдением требований, предъявляемых к напряжению прикосновения, должно обеспечивать в любое время года при стекании с него тока замыкания на землю значения напряжений прикосновения, не превышающие нормированных (см. ГОСТ 12.1.038). Сопротивление заземляющего устройства при этом определяется по допустимому напряжению на заземляющем устройстве и току замыкания на землю.**

## Эксплуатация ЗУ

- Во время эксплуатации ЗУ возможны повреждения его элементов вследствие грунтовой коррозии, проведения земляных работ и т.п.
- Реконструкция, капитальный ремонт подстанции требует проведения полного или частичного обследования (диагностики) ЗУ

## Грунтовая коррозия элементов заземляющего устройства



Круглая сталь диаметром 16 мм



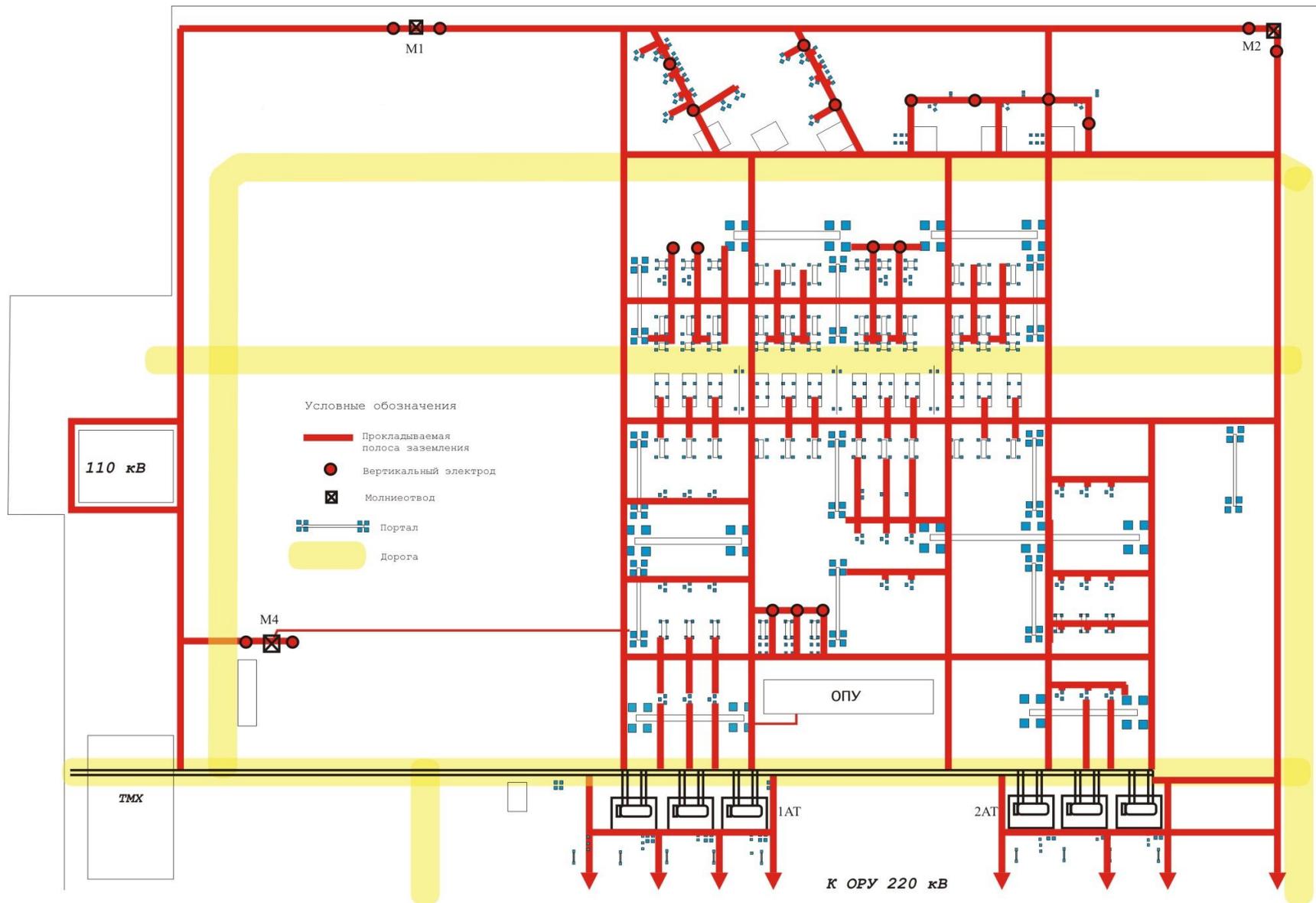
**Стальная полоса сечением 4 x 40 мм<sup>2</sup>**

## Диагностика ЗУ

- Производится не реже 1 раза в 12 лет
  - Нормативные документы, определяющие объем производимых измерений при диагностике ЗУ:
1. **РД 153-34.0-20.525-00** Методические указания по контролю состояния заземляющих устройств электроустановок
  2. **СО 34.35.311-2004** Методические указания по определению электромагнитных обстановки и совместимости на электрических станциях и подстанциях

# Задачи диагностики ЗУ

- Определение потенциала на ЗУ при КЗ на землю
- Определение разностей потенциалов по территории ЗУ (например, между РЩ и местом короткого замыкания она не должна превышать испытательного значения для изоляции контрольных кабелей вторичной коммутации)
- Определение уровней импульсных помех, связанных с подъемом потенциала при коротком замыкании, коммутациях силового оборудования и ударах молнии
- Определение термической стойкости элементов ЗУ протеканию токов КЗ
- Определение коррозионного состояния элементов ЗУ
- Определение реальной (исполнительной) схемы ЗУ
- Определение напряжений прикосновения
- **В итоге:** выдача рекомендаций по ремонту или реконструкции ЗУ, нацеленных на приведение параметров ЗУ к требуемым по нормам по ЭМС и электробезопасности



**Рекомендации по ремонту заземляющего устройства на ОПУ 500 кВ**

## Расчет ЗУ

- При проектировании, реконструкции, ремонте ЗУ требуется проведение численного расчета параметров ЗУ
- Расчет по аналитическим выражениям возможен только для простейших заземлителей в однородных грунтах
- Расчет сложных заземляющих систем в неоднородных грунтах требует применения специализированного ПО

# Расчет простейших заземлителей

Сопротивление вертикального электрода длиной  $l$  и диаметром  $d$  в однородном грунте с удельным сопротивлением  $\rho$ :

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d}$$

Эмпирическая формула для расчета сопротивления заземляющего устройства площадью  $S$  в однородном грунте

$$R = \frac{0.5\rho}{\sqrt{S}}$$

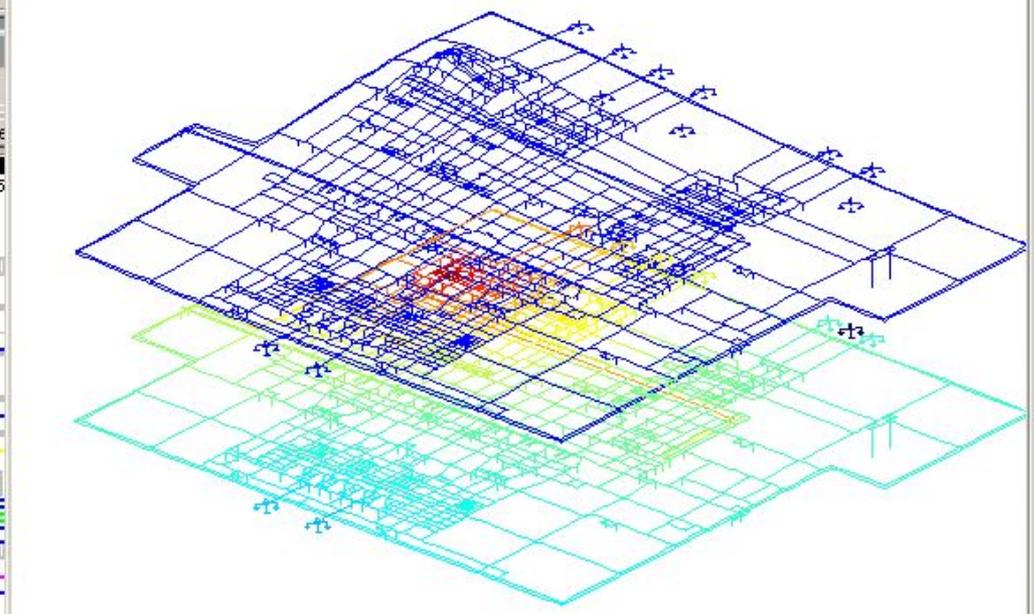
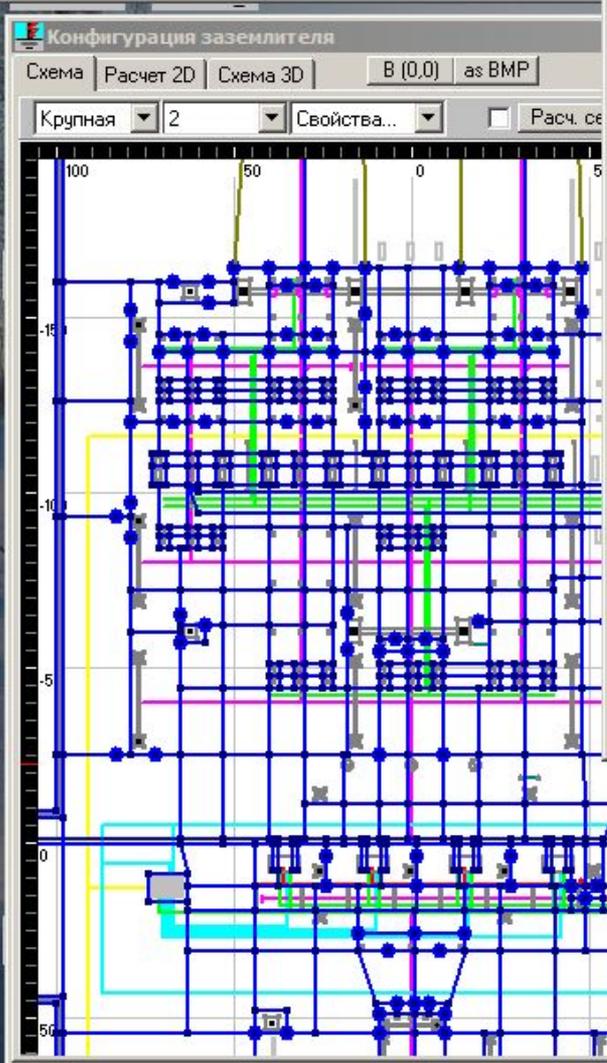
PARSIZ \*Z-10000 Расчет систем неэквипотенциальных ЗУ

File Схема Грунт Расчет Сервис Справка

Файл проекта: C:\Nesterov\Programming\Parsiz\_D6\_ZS\_Z\Алюми  
 Файл расчета: C:\Nesterov\Programming\Parsiz\_D6\_ZS\_Z\Алюми

View3D

Je 0	11.5283	23.0566
Fe 2957.9878	4134.7871	5311.5864
Fp 0	0	0
Fpr0	0	0



2D 2D prk

Solid F(x,y)  
 Узлы  
 Расч. точк  
 Дерево  
 Грунт  
 N узлов  
 I прод знач  
 F узлов 3D  
 J узлов 3D  
 I прод 3D

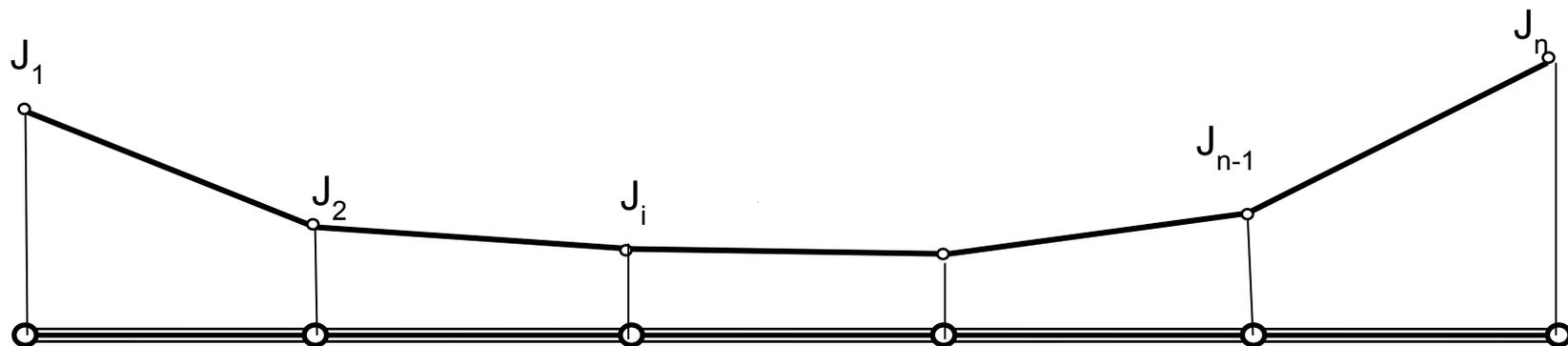
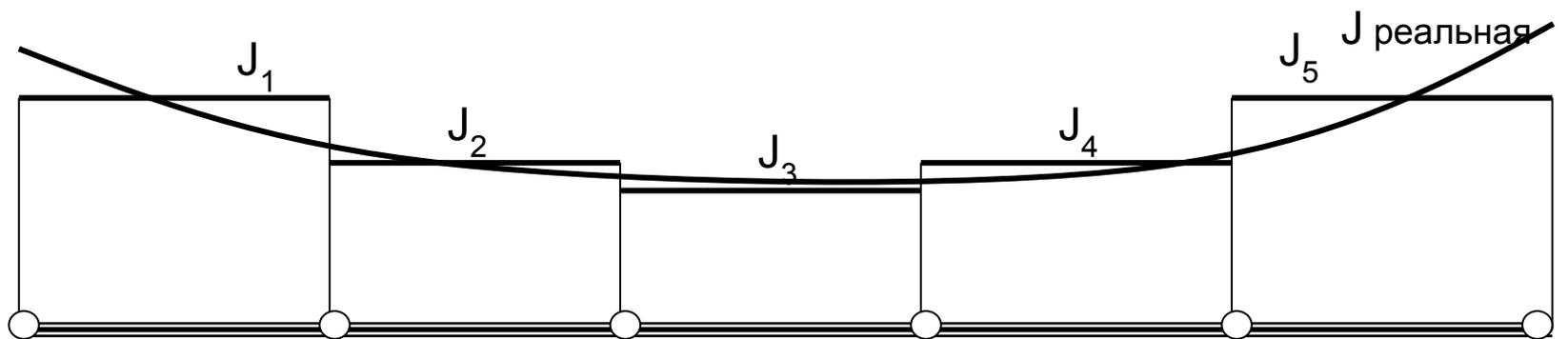
EQI  
 Сетка

Градиент по элементам:  
 Градиент по

Load PAL

# Программа расчета заземляющих систем PARSIZ

- Программа позволяет рассчитать систему заземляющих устройств произвольной конфигурации в грунтах с вертикальной неоднородностью удельного электрического сопротивления. Количество слоев модели грунта до 5.
- Особенности расчетной модели позволяют повысить точность расчета токораспределения по элементам ЗУ и, как следствие, напряжений прикосновения. В программе реализован учет материала элементов ЗУ и наземных коммуникаций (сталь, медь, алюминий). В модель заземляющего устройства могут входить изолированные от грунта проводники (например, экраны кабелей, воздухопроводы, трубы системы пожаротушения, элементы порталов и конструкций аппаратов и т.п.).
- В результате расчета определяется:
  1. Сопротивление заземляющего устройства.
  2. Продольное токораспределение по элементам ЗУ и металлическим коммуникациям, что позволяет оценить их термическую стойкость к токам КЗ.
  3. Потенциал на ЗУ при стекании с него тока КЗ.
  4. Распределение потенциалов по элементам ЗУ с учетом неэквипотенциальности, что позволяет оценить напряжения, прикладываемые к изоляции кабелей вторичных цепей.
  5. Потенциалы на поверхности грунта и на любой глубине.
  6. Ожидаемые напряжения прикосновения.
  7. Напряжения прикосновения.



$$\varphi_j = \sum_{i=1}^M \int_{l_i} \psi_{jx} \cdot J(x) dx$$

$$\varphi_j = \frac{J_{i\kappa} - J_{iH}}{l_i} \int_{l_i} \psi_{jx} x dx + J_{iH} \int_{l_i} \psi_{jx} dx$$

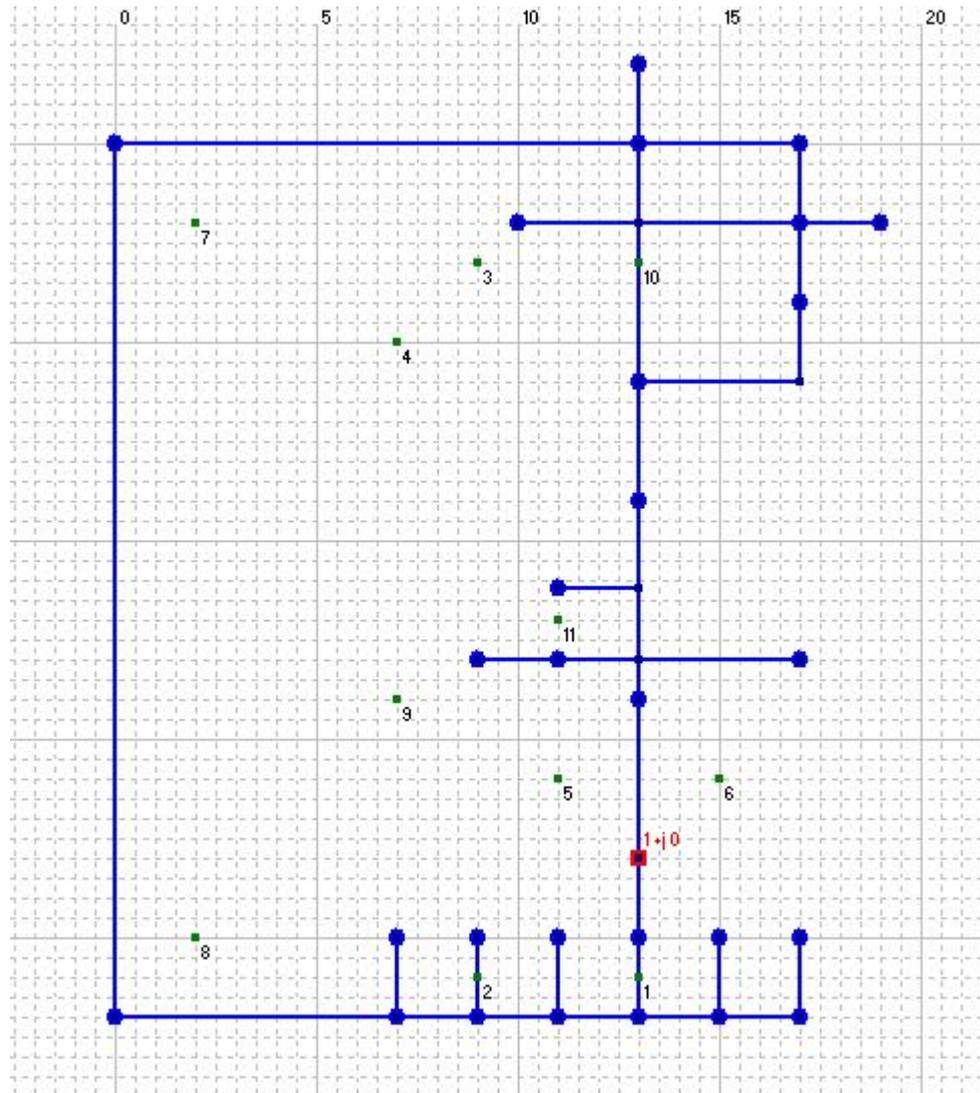
Система уравнений, определяющая продольное и поперечное токораспределение неэквипотенциального ЗУ:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_j = \sum_{i=1}^M [J_{iH} (A_{i,j} - B_{i,j}) + J_{iK} B_{i,j}] \\ \varphi_j = \varphi_{on} - \sum_{k=1}^L \Delta\varphi_k \end{array} \right.$$

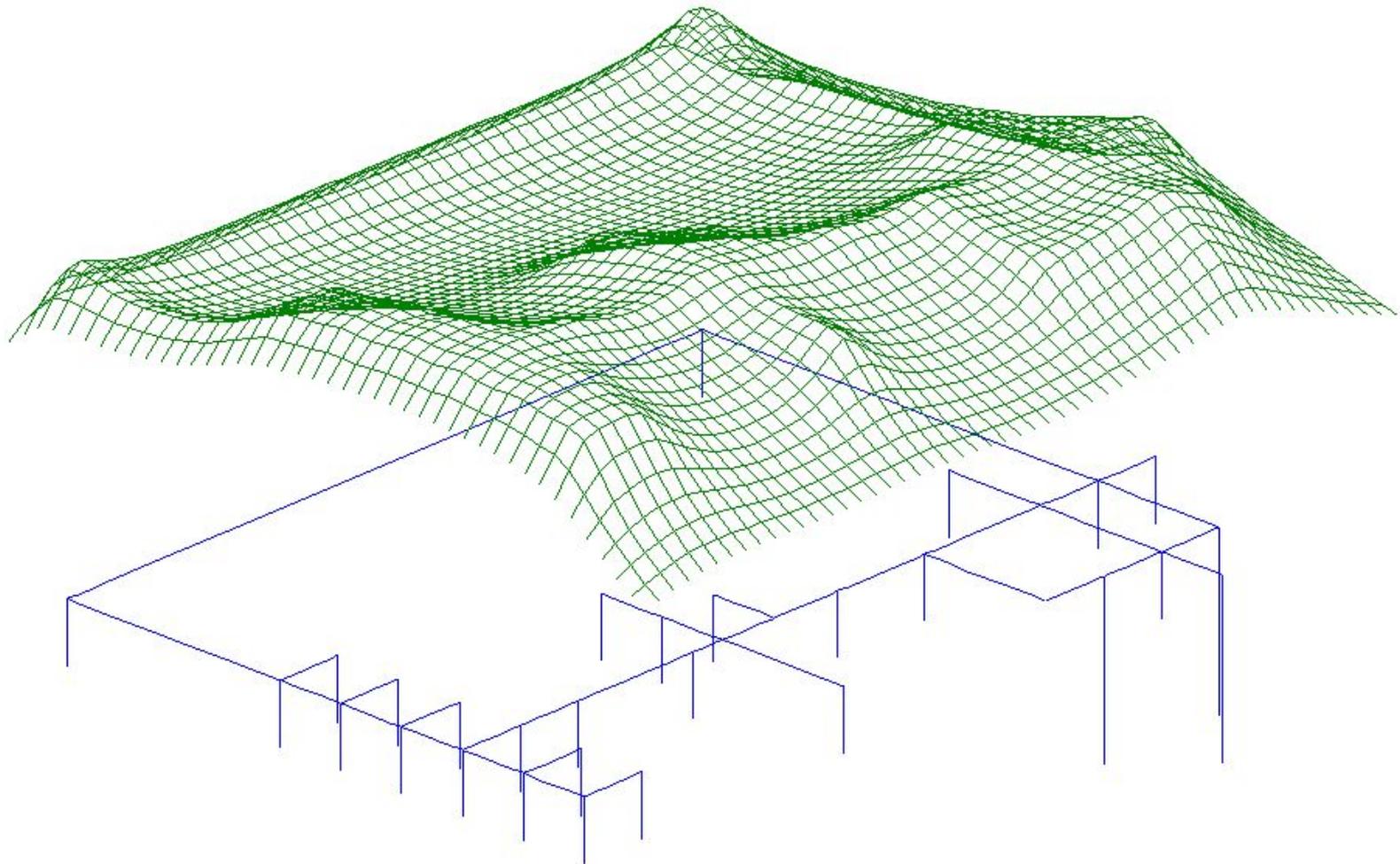
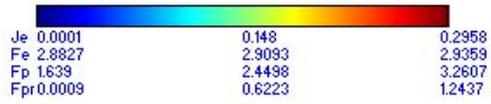
$$\Delta\varphi_i = \int_0^{l_i} Z_i(x) I_i(x) dx$$

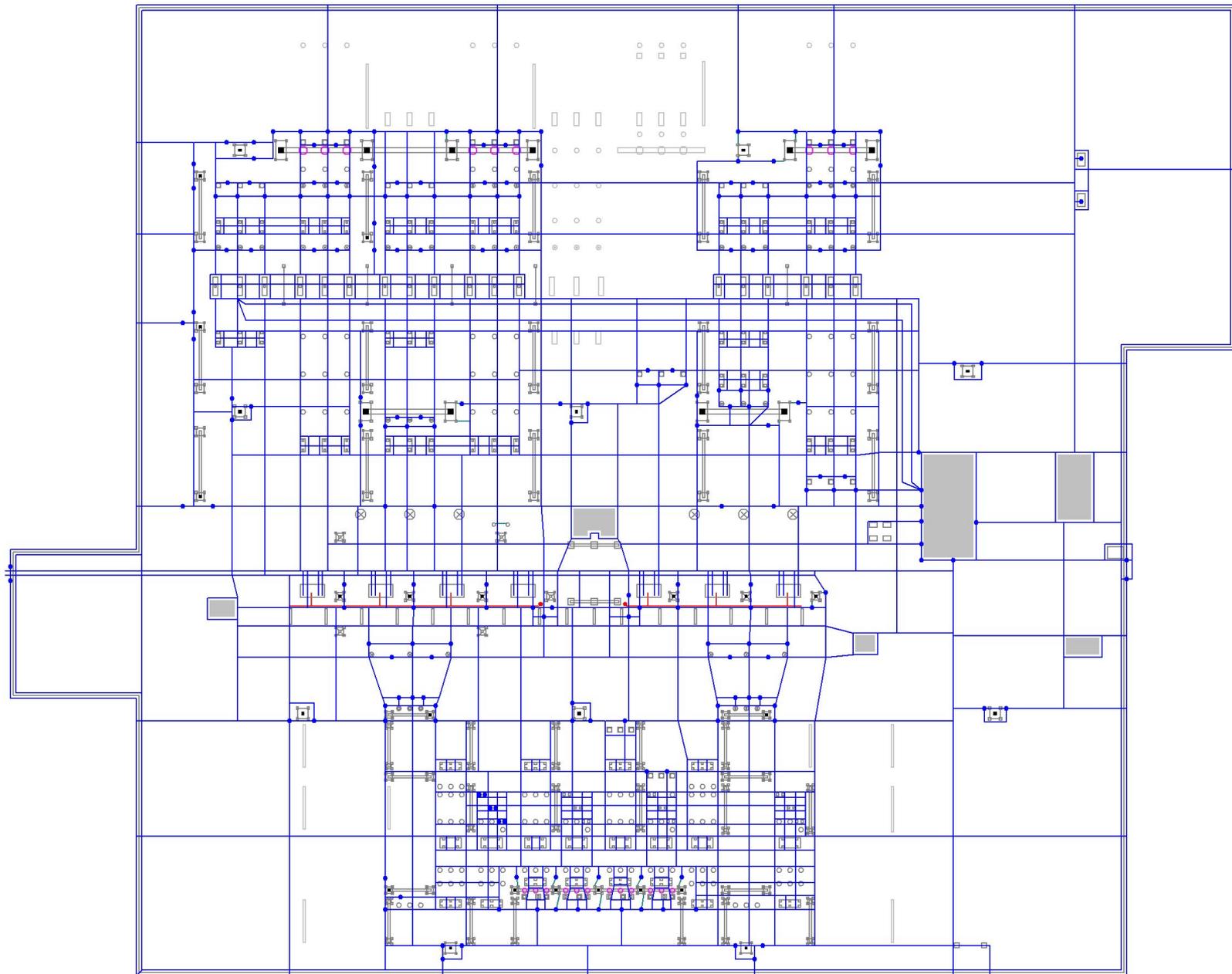
$$I_i(x) = I_{iH} - \frac{J_{iK} - J_{iH}}{l_i} \cdot \frac{x^2}{2} - J_{iH} x$$

$$\Delta\varphi_i = I_{iH} Z_i l_i - J_{iH} \frac{Z_i}{3} l_i^2 - J_{iK} \frac{Z_i}{6} l_i^2$$



Расчетная схема заземляющего устройства





**Эскизный проект ЗУ ПС 500/220<sup>кВ</sup>**



# Вопросы к зачету

1. Заземляющие устройства электроустановок. Роль заземляющего устройства в обеспечении ЭМС.
2. Нормирование, проектирование, расчет и диагностика заземляющих устройств электроустановок.

Спасибо за внимание !