

# ЛЕКЦИЯ № 6. Явления при растекании тока в земле

**ЦЕЛЬ ЛЕКЦИИ:** Раскрыть физические процессы, происходящие при растекании тока замыкания в земле, критерии электробезопасности напряжение прикосновения и напряжение шага.

## УЧЕБНЫЕ ВОПРОСЫ:

1. Растекание тока при замыкании на землю.
2. Напряжение прикосновения.
3. Напряжение шага.

## Литература:

1. Охрана труда в электроустановках. Под ред. Проф. Б.А. Князевского. Учебник для вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Энергия, 1977. – 320 с.
2. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е изд. Раздел 1. Главы 1.1, 1.2, 1.7, 1.9. Раздел 7. Главы 7.5, 7.6, 7.10. – СПб.: Изд. ДЕАН, 2002. – 176 с.

# 1. Растекание тока при замыкании на землю

**Замыканием на землю** называется случайное электрическое соединение находящихся под напряжением частей ЭУ земель.

Замыкание на землю может произойти вследствие появления контакта между токоведущими частями и заземленным корпусом или конструктивными частями оборудования при падении на землю оборванного провода, при нарушении изоляции оборудования и т. п. Во всех этих случаях ток от частей, находящихся под напряжением, проходит в землю через электрод, который осуществляет контакт с грунтом. Специальный металлический электрод принято называть заземлителем.

Размеры электрода могут быть весьма различными - от нескольких сантиметров до десятков и сотен метров. Форма электрода может быть очень сложной, и закон распределения потенциалов в электрическом поле электрода определяется сложной зависимостью. Состав, а значит, и электрические свойства грунта - неоднородны, особенно если учесть слоистое строение грунта.

С целью упростить картину электрического поля и его анализ делается допущение, что ток стекает в землю через одиночный заземлитель полусферической формы, погруженный в однородный и изотропный грунт с удельным сопротивлением  $\rho$ , во много раз превышающим удельное сопротивление материала заземлителя (рисунок 1.1).

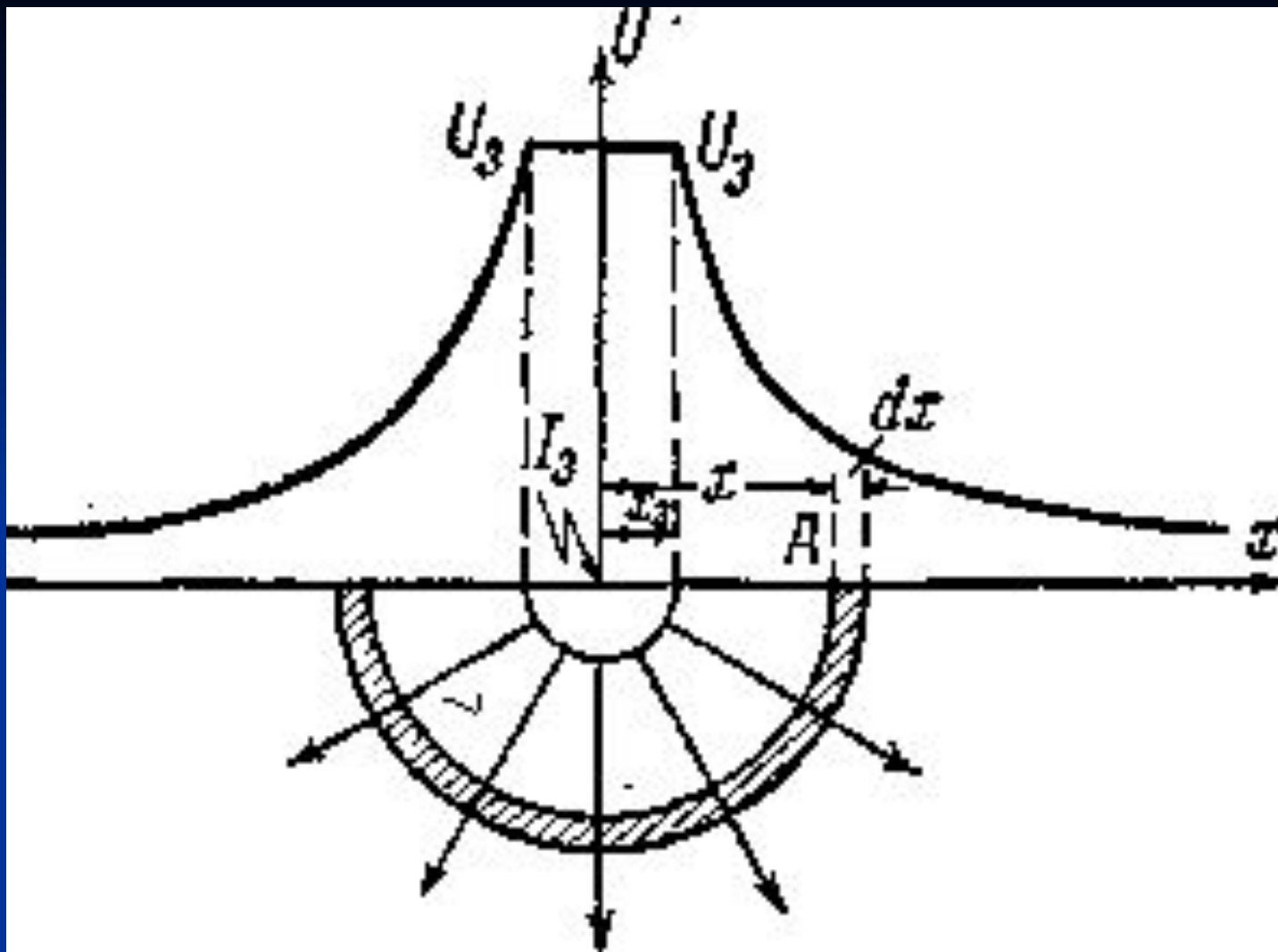


Рисунок 1.1 - Растекание тока в грунте через полусферический заземлитель

Если второй электрод находится на достаточно большом удалении, то линии тока вблизи исследуемого заземлителя направлены по радиусам от центра полусферы. При этом линии тока перпендикулярны как к поверхности самого заземлителя, так и к любой полусфере в грунте, концентричной с ним.

Поскольку грунт однородный и изотропный, ток распределяется по этой поверхности равномерно.

Для определения потенциала точки  $A$ , лежащей на поверхности радиусом  $x$ , выделим элементарный слой толщиной  $dx$ .

Окончательное выражение для определения потенциала точки  $A$  будет

$$\varphi_a = U_a = k/x \quad (1.1)$$

Данное выражение является уравнением гиперболы, таким образом, потенциал точки  $A$  изменяется по гиперболическому закону (рисунок 1.1).

Такое распределение потенциалов объясняется формой проводника - грунта, поперечное сечение которого возрастает пропорционально квадрату расстояния от центра заземлителя  $x^2$ .

Если проводник, например, проволока, имеет постоянное сечение по всей длине, падение напряжения на любом участке пропорционально длине этого участка (рисунок 1.2, а).

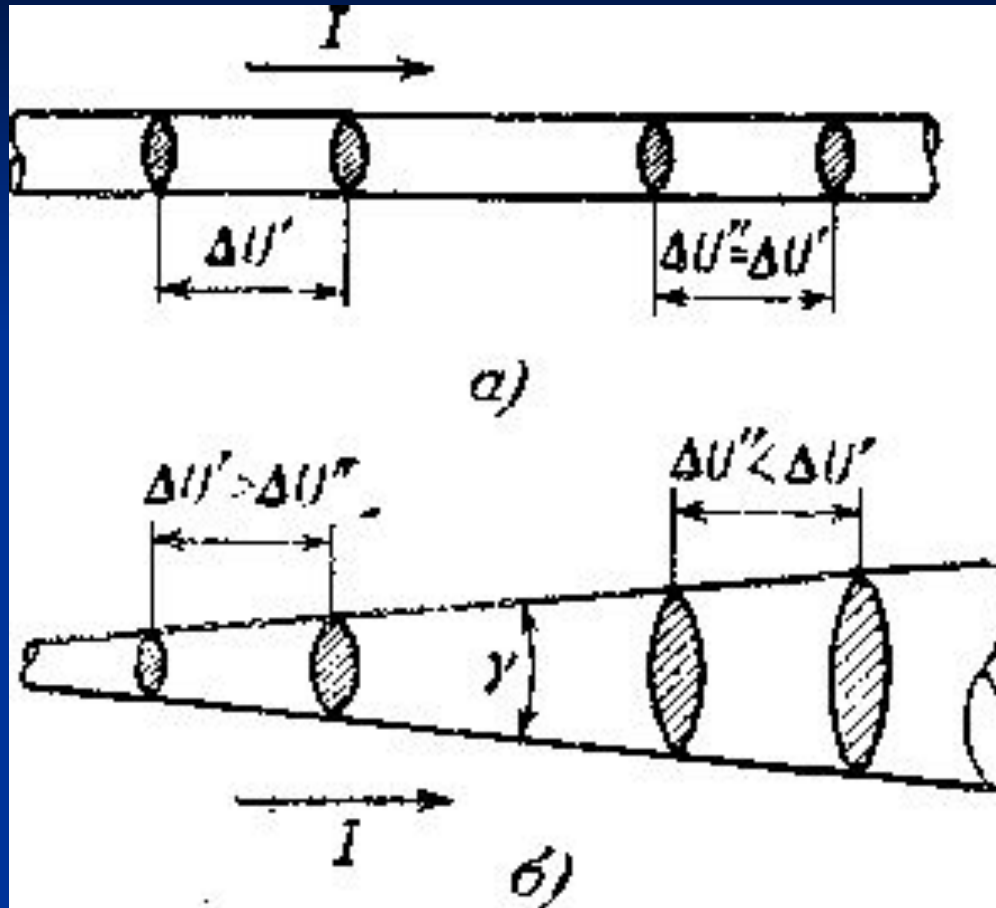


Рисунок 1.2 - Падение напряжения в проводнике:  
а - цилиндрической формы; б - конической формы;  
 $\gamma$  - угол при вершине конуса.

Проводник, имеющий форму конуса (рисунок 1.2, б) оказывает разное сопротивление току на разных участках одинаковой длины, так как сопротивление этих участков различно. Грунт вблизи заземлителя можно рассматривать как проводник конической формы с вершиной в центре заземлителя и углом при вершине конуса, равным  $\gamma = 180^\circ$ .

Наибольшее падение напряжения наблюдается у заземлителя; более удаленные участки грунта имеют большее поперечное сечение и оказывают меньшее сопротивление току.

Если точка  $A$  находится на значительном удалении от электрода, т. е.  $x \rightarrow \infty$ , то потенциал ее равен нулю.

По мере приближения точки  $A$  к центру электрода растет потенциал и на поверхности электрода, где расстояние от центра равно  $X_3$ :

$$\varphi_3 = U_3 = I_3 \rho / 2\pi X_3 \quad (1.2)$$

Это и есть потенциал электрода, или **напряжение электрода относительно земли**.

Так как материал заземлителя (металл) имеет удельное сопротивление значительно меньшее, чем грунт, падение напряжения на заземлителе ничтожно мало и поверхность заземлителя является эквипотенциальной поверхностью.

Корпус ЭУ, заземленный через этот заземлитель, будет иметь тот же потенциал, если пренебречь сопротивлением соединительных проводов.

Таким образом, **напряжением корпуса электроустановки относительно земли** называют напряжение между корпусом и точками грунта, потенциал которых может быть принят равным нулю.

В цепи замыкания на землю наибольшим потенциалом обладает заземлитель. Точки, лежащие на поверхности грунта, имеют тем меньший потенциал, чем дальше они находятся от заземлителя: в пределе потенциал удаленных точек грунта стремится к нулю.

Область поверхности грунта, потенциал которой равен нулю, называется *электротехнической землей*. Плотность тока в земле также равна нулю.

Практически земля начинается с расстояния  $x = 10 - 20$  м от заземлителя.

Область грунта, лежащая вблизи заземлителя, где потенциалы не равны нулю, называется *полем растекания* (тока).

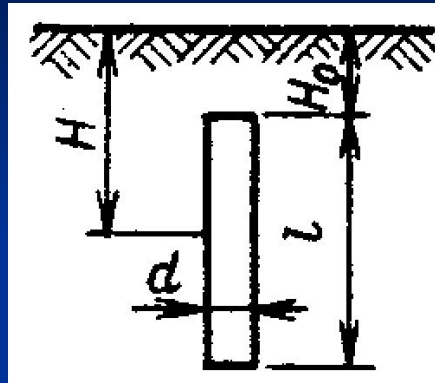
*Сопротивление заземлителя растеканию тока* (сопротивление растеканию) может быть определено как суммарное сопротивление грунта от заземлителя до любой точки с нулевым потенциалом (земли)

$$R_{\text{раст}} = \rho / 2\pi X_z \quad (1.3)$$

Расчетным путем были получены эмпирические формулы для определения сопротивления одиночных заземлителей различного типа.

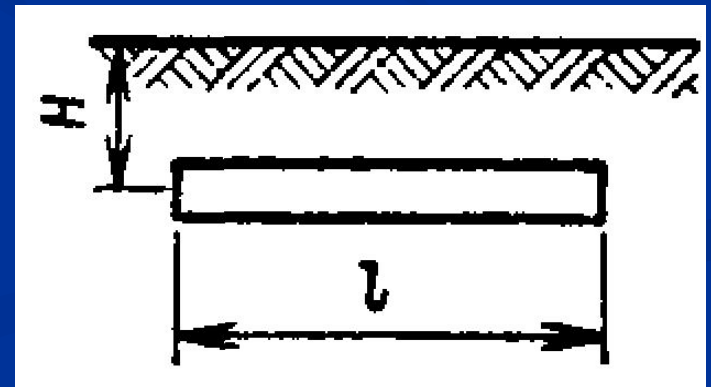
Наиболее используемые:

Стержневой в грунте



$$R = \rho / 2\pi l \cdot \ln(2l/d) + 1/2 \ln[(4H+1)/(5H-1)] \quad \text{для } H_0 \geq 0,5 \text{ м}$$

Протяженный полосовой на поверхности грунта



$$R = \rho / 3\pi l \cdot \ln(12/dH)$$



## 2. Напряжение прикосновения

Напряжением прикосновения называется разность потенциалов между точкой прикосновения человека к токоведущей части ЭУ и точкой земли, на которой стоит человек или между точкой прикосновения человека второй рукой к заземленным металлоконструкциям.

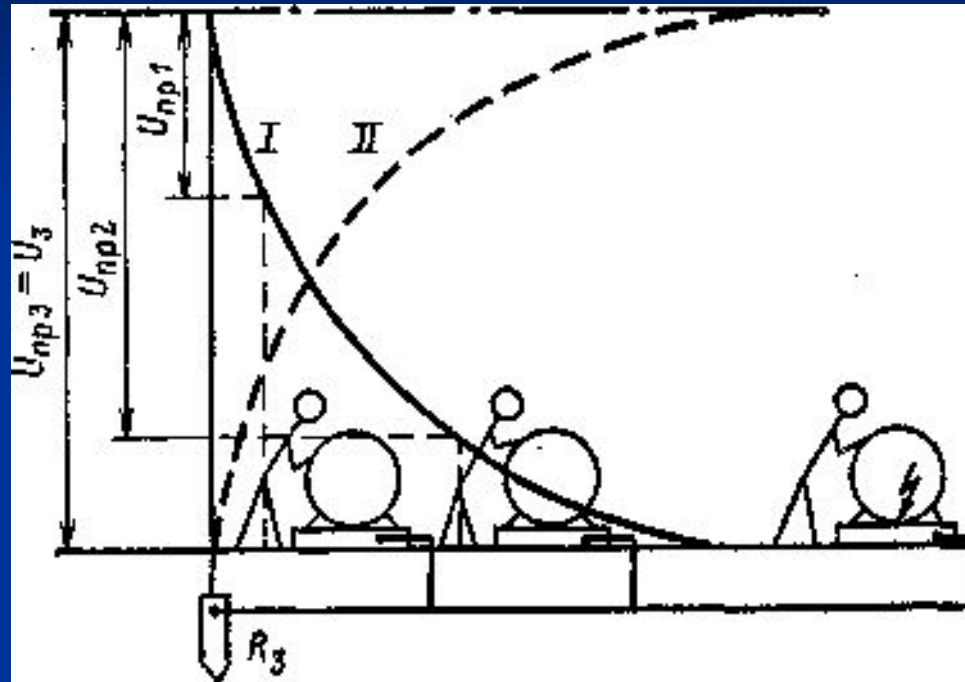


Рисунок 2.1 - Напряжение прикосновения к заземленным нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением:

I - кривая распределения потенциалов;

II - кривая распределения напряжения прикосновения.

### 3. Напряжение шага

Напряжением шага называется разность потенциалов между точками ног человека, расположенными на поверхности земли в зоне растекания тока замыкания на землю.

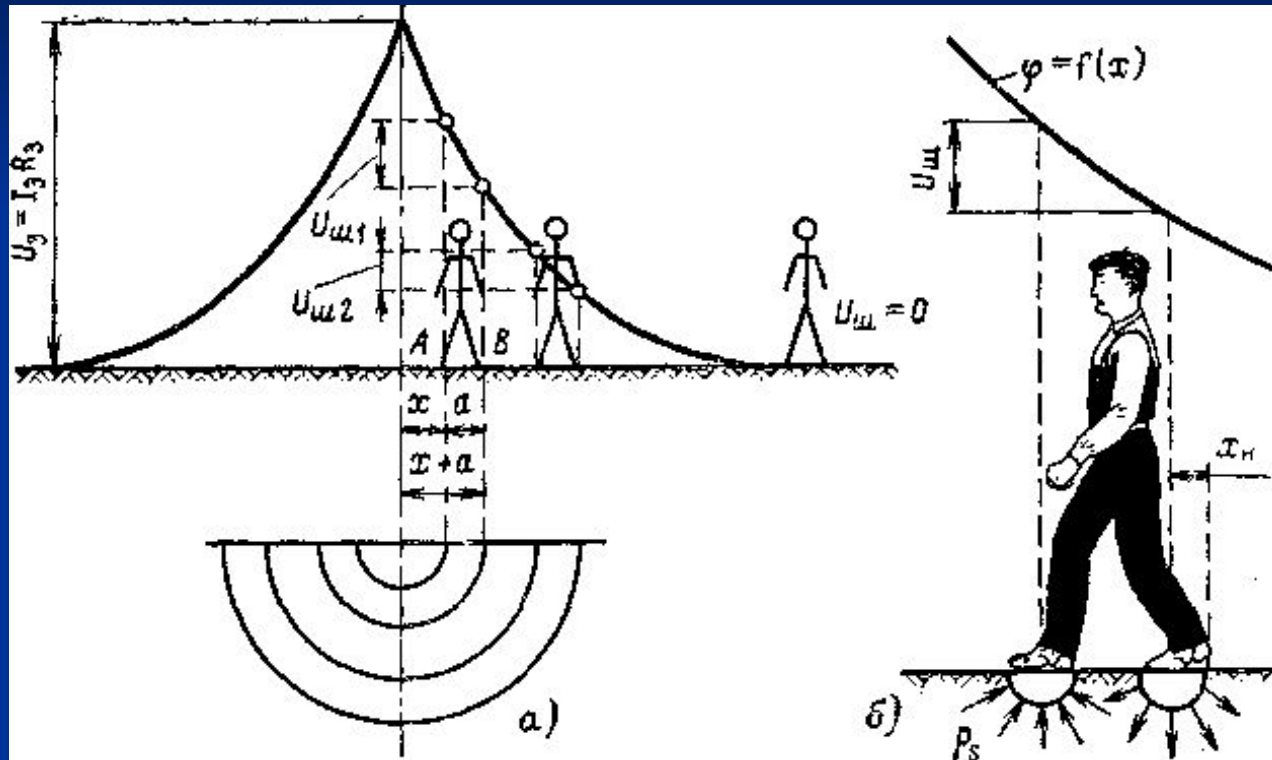


Рисунок 3.1 - Напряжение шага:

а - общая схема;

б - растекание тока с опорной поверхности ног человека.