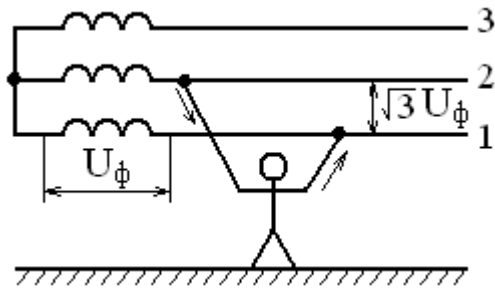


Лекция №3 (продолжение темы №2).

Токи замыкания в цепи.

1. Двухфазное (двухполюсное) прикосновение к токоведущим частям.



При прикосновении к двум точкам с U образуется замкнутая электрическая цепь и через тело человека проходит ток. Его величина зависит от параметров сети и R_h .

Рис.3.

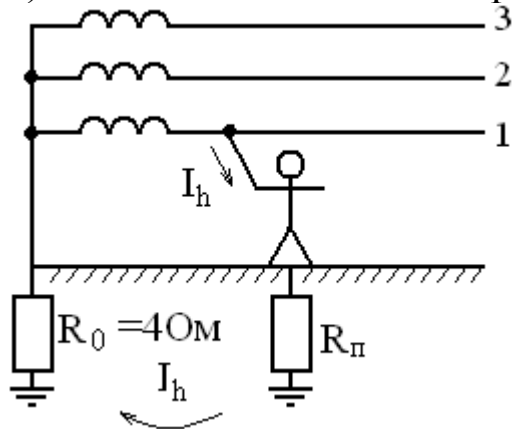
$$I_h = \frac{U_A}{R_h} = \frac{\sqrt{3}U_{\phi}}{R_h}, (3)$$

для $U_{\phi} = 220В$ и $I_h = 380мА$
 $R_h = 1000Ом$

ток смертельно опасен

2. Однофазное прикосновение к токоведущим частям.

а) сеть с заземленной нейтралью:

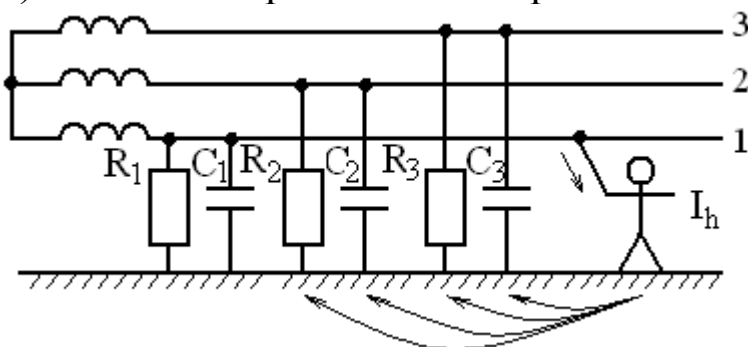


$$I_h = \frac{U_{\phi}}{R_h + R_n + R_0}, (4)$$

при сопротивлении поля $R_n \rightarrow 0$ ток в этом случае смертельно опасен.

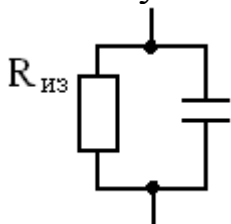
$$I_h \cong \frac{U_{\phi}}{R_h} = \frac{220}{1000} = 220мА$$

б) сеть с изолированной нейтралью:



Цепь тока замыкается через тело человека, землю и далее через сопротивления изоляции и емкости фаз.

R и C распределенные в сети параметры, обусловленные активной проводимостью изоляции и емкостью фаз относительно земли. На схемах условно эти параметры заменяют сосредоточенными.

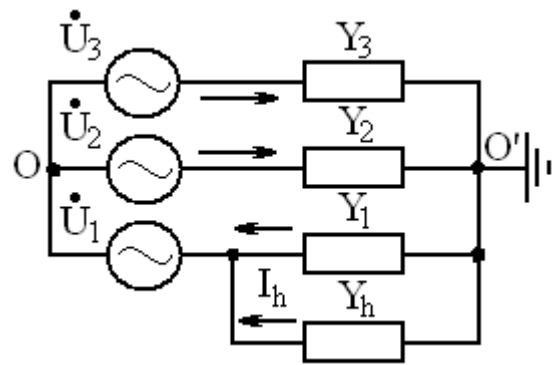


$$\frac{1}{\omega C} = x_c$$

$$\omega = 2\pi f = 314с^{-1}$$

$$Y = g_{из} + j\omega C$$

Рис.7. Схемы замещения.



Определим ток I_h через тело человека.

В симметричном режиме сети

$$Y_1 = Y_2 = Y_3 = Y$$

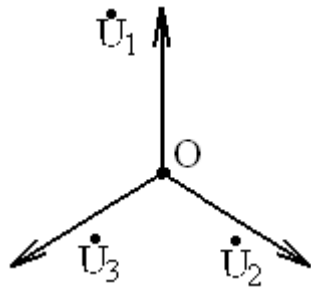
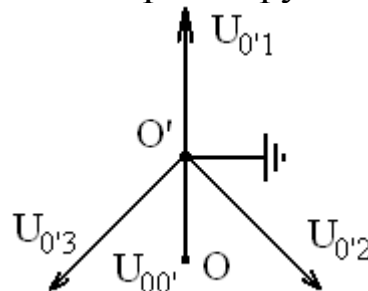


Рис.8.

В случае прикосновения человека, напр., к первой фазе симметрия нарушается



Человек оказывается под напряжением $\dot{U}_{0'1}$. Найдем $\dot{U}_{00'}$, т.е. потенциал нейтрали относительно земли. Согласно известному методу двух узлов напряжение между ними (в нашем случае между землей и нейтральной точкой) равно:

$$\dot{U}_{00'} = \frac{\dot{U}_1(Y_1 + Y_2) + \dot{U}_2 Y_2 + \dot{U}_3 Y_3}{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_h + Y_H}, (5)$$

Послед. соед.

R, L, C

компл. сопр.

$$Z = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}) = R + jx$$

$$z = |Z| = \sqrt{R^2 + x^2}$$

Паралл. соед.

R, L, C

компл. провод.

$$Y = g - j(\frac{1}{\omega L} - \omega C) = g - jb$$

$$y = |Y| = \sqrt{g^2 + b^2}$$

$$\varphi = \arctg \frac{b}{g}$$

С учетом того, что $Y_1 = Y_2 = Y_3 = Y_h$ и $\dot{U}_1 = U_\phi$, $\dot{U}_2 = a^2 U_\phi$,

$\dot{U}_3 = a U_\phi$ (где $a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ фазный оператор) можно записать (после преобразований) $\dot{U}_{00'} = U_\phi \frac{Y_h}{3Y + Y_h + Y_H}, (6)$

Ток через тело человека.

$$I_h = \frac{\dot{U}_{0'1}}{R_h} = \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_{00'}}{R_h} = \frac{U_\phi}{R_h} \cdot \frac{3Y}{3Y + Y_h} = \frac{3U_\phi}{3/Y_h + 1/Y}, (7)$$

Или (выражая через сопротивления R_{uz} и X_c)

$$\dot{I}_h = \frac{3U_\Phi}{3R_h + Z}, (8)$$

где Z – комплексное сопротивление изоляции провода относительно земли

$$Z = \frac{1}{Y} = \frac{1}{\frac{1}{R_{из}} + j\omega C}$$

В действительной форме этот ток равен

$$I_h = \frac{U_\Phi}{R_h} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{R_{из}(R_{из} + 6R_h)}{9R_h^2(1 + R_{из}^2\omega^2C^2)}}}, (9)$$

Частные случаи.

а) $R_1 = R_2 = R_3 = R_{из}$; $C \rightarrow 0$ (короткие линии) тогда $Y = \frac{1}{R_{из}}$, $Z = R_{из}$.

Ток через человека в действительной форме равен

$$I_h = \frac{3U_\Phi}{3R_h + R_{из}}, (10)$$

б) $C_1 = C_2 = C_3 = C$ и $R_{из} \rightarrow \infty$ (что может иметь место в кабельных сетях) тогда, $Y = j\omega C = \frac{j}{x_c}$, $Z = \frac{1}{Y} = -jx_c$

Ток через человека в действительной форме равен

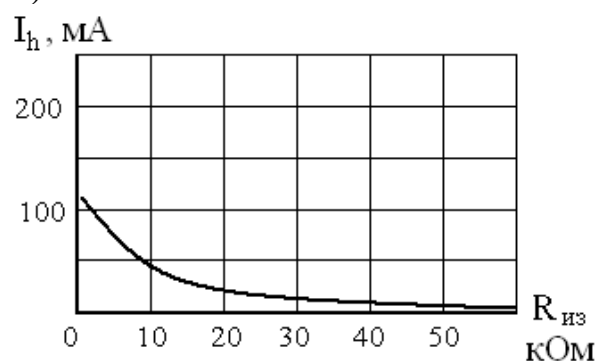
$$I_h = \frac{3U_\Phi}{\sqrt{9R_h^2 + (\frac{1}{\omega C})^2}}, (11)$$

В ПУЭ нормируется $R_{из}$ на 1 фазу на одном участке:

- силовая электропроводка $R_{из.дон} \geq 0,5 \text{ МОм}$;
- цепи управления, вторичная коммутация $R_{из.дон} \geq 1 \text{ МОм}$.

Для случаев а) и б) изменение тока через тело человека в зависимости, соответственно, от $R_{из}$ и C показано на рисунках:

а)



б)

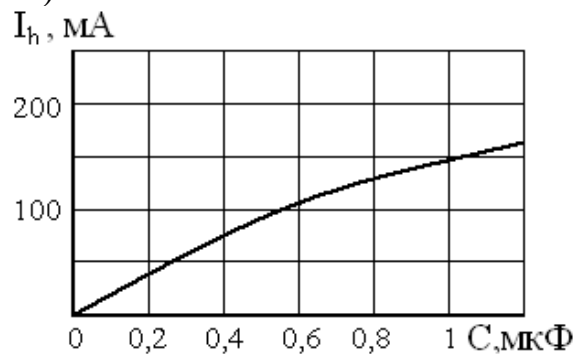


Рис.9. Зависимость I_h от $R_{из}$ и C .

Для определения критического сопротивления изоляции (из расчета длительно – допустимого тока – для 3с $I_{h.дон} = 6 \text{ mA}$) используют выражение (10) $R_{из.кр} = \frac{3U_\Phi - 3R_h I_{h.дон}}{I_{h.дон}}$

Контроль изоляции.

Для контроля применяют:

1. Измерение $R_{из}$ в отключенной установке один раз в год, а также вне очереди при обнаружения дефектов и после ремонта.

$$R_{из} \geq R_{из.доп}$$

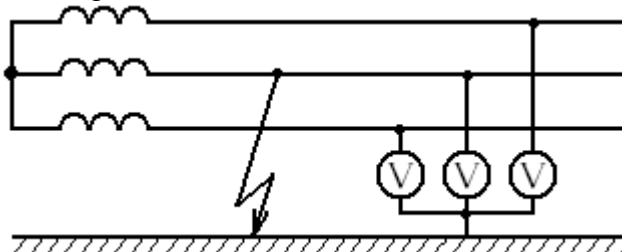
2. Испытание повышенным напряжением в отключенной установке, т.е. испытывают эл. прочность изоляции (способность выдерживать рабочее напряжение) и выявляют дефекты.

$$U_{исп} = 2 \div 3 U_{ном} \text{ в течении } \underline{1 \text{ минуты}}$$

3. Непрерывный контроль и измерение $R_{из}$ без отключения рабочего напряжения.

а) Метод 3-х вольтметров.

Рис.10.



В сеть между каждой фазой и землей включают вольтметры с большим омическим сопротивлением. Способ наиболее простой, но имеет недостатки:

- схема не реагирует на симметричное снижение $R_{из}$ всех фаз;
- на показания вольтметров оказывают влияние емкостные составляющие сопротивлений изоляции.

б) Метод наложения оперативного тока на рабочий.

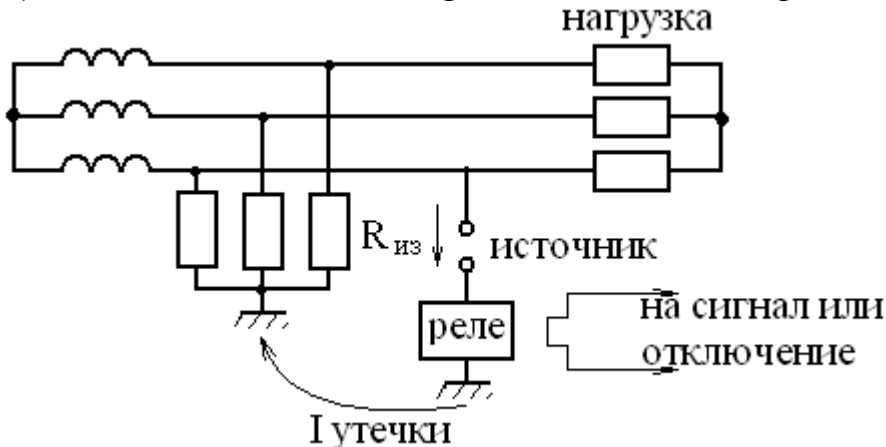


Рис.11.

Ток утечки зависит от состояния изоляции $I_{ут} = f(R_{из})$

Преимущества: схема реагирует на симметричное и несимметричное снижение $R_{из}$; имеется сигнализация о предельно — допустимом снижении $R_{из}$; входное сопротивление схемы высокое, что обеспечивает надежность.

Компенсация емкостных токов.

Протяженные сети, кабельные линии обладают большой емкостью фаз относительно земли ($C = 0,25 \div 1 \text{ мкФ}$) и большим сопротивлением изоляции фаз $R_{из} \rightarrow \infty$.

$$I_h = \frac{3U_\phi}{\sqrt{9R_h^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

Изменение тока I_h при увеличении C показано на рисунке 9-б. При больших емкостях фаз ток опасен даже при $R_{uz} \rightarrow \infty$.

Для компенсации емкостной составляющей тока через человека в нейтраль или на каждую фазу включают индуктивное сопротивление – дроссель.

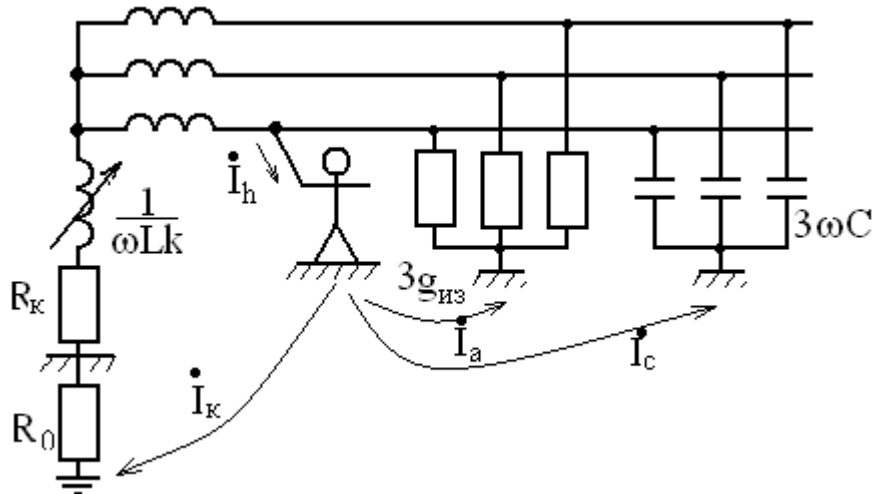
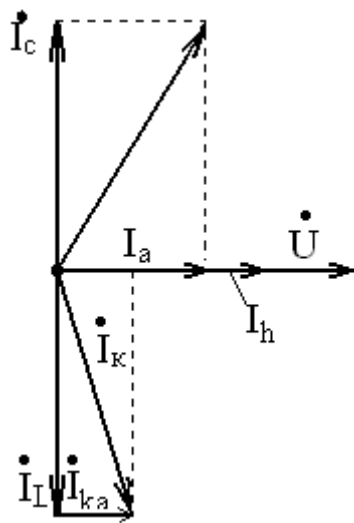


Рис.12. Схема компенсации емкостных токов.



Ток проходящий через человека, равен геометрической сумме токов:

$$\dot{I}_h = \dot{I}_a + \dot{I}_c + \dot{I}_k, (11)$$

Для компенсации емкостной составляющей необходимо: $\dot{I}_c + \dot{I}_{kp} = 0$

Из векторных диаграмм следует, что

индуктивная составляющая $\dot{I}_{kp}$

отстает от емкостной $\dot{I}_c$ на 180° , т.е. находится в противофазе.

Рис.13. Векторная диаграмма токов через человека.

При полной компенсации ток I_h равен

$$I_h = \frac{U_\phi}{R_h} \cdot \frac{3g_{uz} + g_k}{3g_{uz} + g_h + g_k}, (13)$$

где $g_k = \frac{r_n}{r_n^2 + (\omega Lk)^2}$ - проводимость дросселя ($r_n = Rk + R_o$) R_{uz}

Ток I_h зависит только от активных сопротивлений R_{uz} и r_n .



Требуемая для полной компенсации индуктивность дросселя находится из условия $\dot{I}_c = -\dot{I}_{KP}$.

Рис.14. Зависимость $I_h(c)$

$$U_{\Phi} j3\omega C = -(-j \frac{1}{\omega L_k}) U_{\Phi}, (14)$$

$$L_k = \frac{1}{3\omega^2 C}$$

Защитное заземление.

Однофазные замыкания на корпус создают опасные потенциалы на нем и возле него из-за растекания тока с основания на землю. Существуют три способа защиты от поражения:

- автоматическое отключение за время менее допустимого; этот способ называется защитным отключением;
- снижение потенциала на корпусах до допустимой величины путем защитного заземления;
- зануление – обеспечивает автоматическое отключение и снижение потенциала на корпусах до допустимой величины.

В сетях с изолированной нейтралью токи замыкания (в случае попадания напряжения на корпус) недостаточны по величине для срабатывания автоматического отключения. Поэтому в таких сетях используют защитное заземление.

Нормирование заземлений по *ГОСТ 12.1.030-81*. Заземление применяется при $U \leq 1000V$ в сетях с изолированной нейтралью, при $U \geq 1000V$ - в сетях с любым режимом нейтрали.

Заземление обязательно при $U \geq 500V$ во всех случаях; при $U \geq 36V$ в помещениях особо опасных и с повышенной опасностью; независимо от U во взрывоопасных помещениях.

С целью обеспечения надежного контакта с землей корпуса, оболочки машин, аппаратов соединяют с заземлителем, находящимся в земле.

В этом случае при попадании фазы на корпус он окажется под напряжением $U_3 = I_3 R_3, (15)$

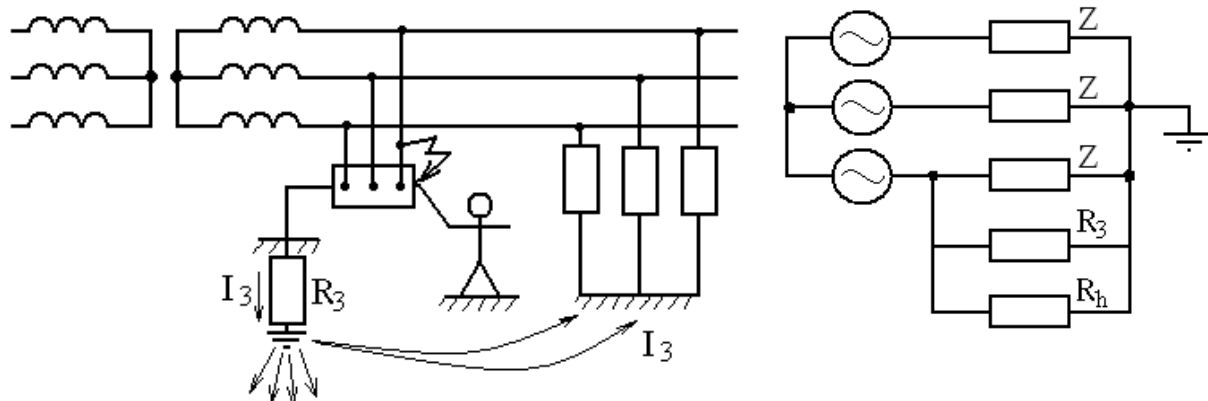


Рис.15.Схема заземления: а) принципиальная, б) замещения.

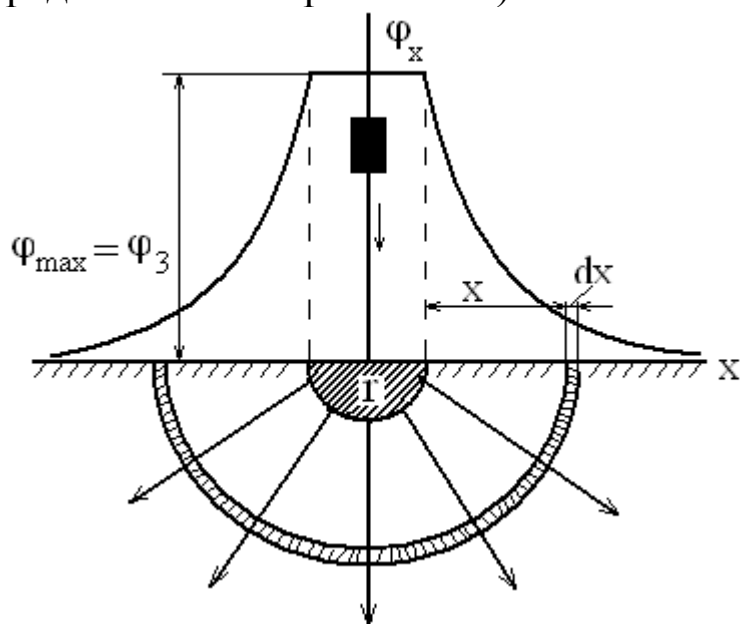
Ток через тело человека при прикосновении к корпусу будет равен.

$$I_h = I_3 \frac{R_3}{R_h}, (16)$$

Чем меньше R_3 , тем меньше ток I_h .

Потенциал и сопротивление заземлителей.

Рассмотрим методику определения распределения потенциала в зоне растекания тока с заземленного корпуса и сопротивления заземлителя на примере полусферического заземлителя(считаем грунт однородным, а значит растекание тока замыкания равномерным по радиальным направлениям).



В грунте под воздействием растекающе-гося тока создается электрическое поле с напряженностью E . Плотность тока δ (дельта) убывает по мере роста диаметра полусферы

$$\delta = \frac{I_3}{2\pi(r+x)^2}$$

Рис.16.

Напряженность электрического поля определяется по выражению:

$$E = \frac{dU}{dx}; \quad E = \rho\delta = \rho \frac{I_3}{2\pi(r+x)^2}; \quad d\varphi = Edx \quad \varphi_x = \int_{r+x}^{\infty} Edx;$$

$$\varphi_x = \int_x^{\infty} dU = \int_x^{\infty} Edx$$

Потенциал земли равен $\varphi_x = \frac{I_3\rho}{2\pi(r+x)}, (17)$

т.е. он убывает по гиперболическому закону с увеличением расстояния x .

Из анализа зависимости $\varphi_x(x)$ следует:

- при $x \rightarrow \infty$ $\varphi_x \rightarrow 0$. (зоной нулевого потенциала называется участок земли, где φ малозаметен - $x \geq 20m$);
- при $x \rightarrow 0$, $\varphi_x \rightarrow \varphi_{\max} = \varphi_3$

$$U_3 = \varphi_3 - 0 = \frac{I_3 \rho}{2\pi r}, (18)$$

Напряжение зз. называется падение напряжения на сопротивлении земли между зз. и зоной нулевого потенциала. Сопротивлением заземления называется сопротивление земли возле зз:

$$R_3 = \frac{U_3}{I_3} = \frac{\rho}{2\pi r}, (19)$$

Сопротивление зз. зависит от ρ грунта, формы зз. и его размеров.

Приближенные значения ρ		Электрическое сопротивление грунта характеризуется его объемным удельным сопротивлением ρ , т.е. сопротивлением куба грунта с ребром длиной 1м или 1см. единица ρ - 1Омм
Вода, грунт	ρ , Ом м	
Морская вода	0,2 - 1	
Речная вода	10 - 100	
Глина	8 - 70	
Суглинок	40 - 150	
Песок	400 - 700	
Каменистый	500 - 800	

При расчете зз. ρ измеряют на месте их сооружения.

Сопротивление одиночных заземлителей.

В качестве таких зз. применяют :

- а) вертикальные электроды длиной $l = 3 \div 10m$, диаметром $d = 0,012 \div 0,02$ (трубы при $l \geq 50d$)

$$R_{з.в.} \approx \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d}; (при\ l \geq 50d), (20)$$

- б) горизонтальные полосы, их закладывают в траншеи глубиной $t = 0,5 \div 0,8m$; L – длина полосы; b - ширина

$$R_{з.н.} \approx \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{2L^2}{bt}, (21)$$

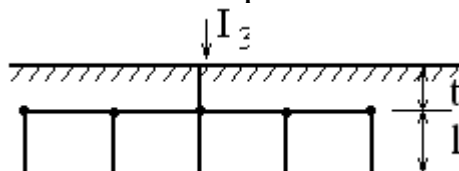
Проектирование зз. по допустимому R_3 .

На заданной площади подбирают и рассчитывают конструкцию зз. (размеры и число электродов) таким образом, чтобы выполнялось неравенство:

$$R_3 \leq R_{з.дон}, (основное\ расчетное\ уравнение), (22)$$

Применяются следующие конструкции зз.:

1.



		$R_{з.дон}$		
		$\leq 1000B$	$> 1000B$	
$\leq 100kBA$	> 100	Зазем. нетрл.		
100м	40м	0,50м	$\frac{250}{I_3} \leq 10$	$\frac{125}{I_3} \leq 10$

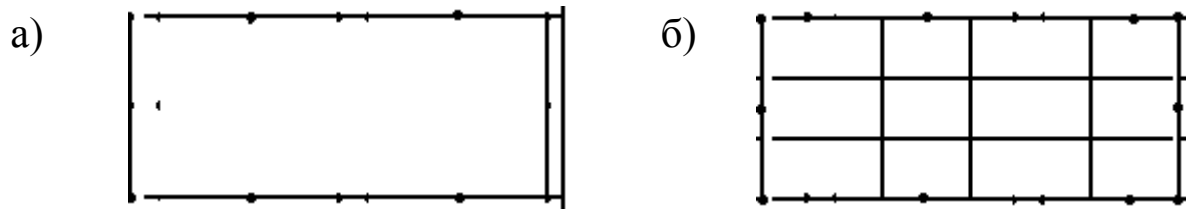


Рис.17. Контур (а) и сетка (б) с вертикальными электродами.

$$R_3 = \frac{0,42\rho}{\sqrt{S+l+t}} + \frac{\rho}{L+nl}, (23)$$

где S – площадь зз.;

l, n – длина и число вертикальных электродов;

L – общая длина горизонтальных полос;

t – глубина из заложения в землю.

2.

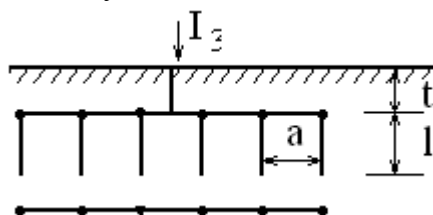


Рис.18. Полоса с вертикальными электродами.

$$R_3 = \frac{\rho}{2\pi L} K_B \ln \frac{2L^2}{bt}, (24),$$

где $K_B = f(l/L, a/l)$ –

коэффициент, учитывающий
снижение R_3 за счет
вертикальных электродов.

3.

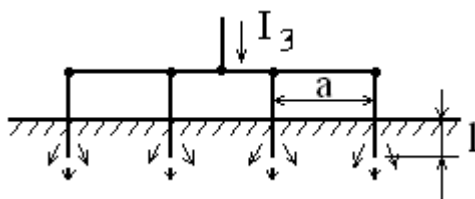


Рис.19. Вертикальные электроды без
полосы связи в земле.

$$R_3 = \frac{R_{з.в.}}{n \cdot \eta}, (25)$$

где $R_{з.в.}$ – сопротивление
одного вертикального
заземлителя (по 20);

n – число в.з.

$\eta = f(a/l, n)$ – коэффициенты использования вертикальных электродов;
учитывает явление взаимного экранирования полей при
растекании тока с электродов.

Для самостоятельной работы:

Князевский Б.А. – с. 197 ÷ 217