

**P - phase - фаза, N - нулевой провод (или грозотрос)**

$$S_P := 95 \cdot 10^{-6} \quad \text{сечение фазы}$$

$$S_N := 50 \cdot 10^{-6} \quad \text{сечение нулевого провода}$$

Удельное сопротивление и температура

$$T := 65 \quad \alpha := 4.3 \cdot 10^{-3}$$

$$\rho_{P\_20} := 2.94 \times 10^{-8} \quad \text{Ом*м} \quad \text{Алюминий} \quad \rho_{N\_20} := 2.94 \times 10^{-8} \quad \text{Ом*м} \quad \text{Алюминий}$$

$$\rho_P := \rho_{P\_20} \cdot [1 + \alpha \cdot (T - 20)] = 3.509 \times 10^{-8} \quad \text{Ом*м}$$

$$\rho_N := \rho_{N\_20} \cdot [1 + \alpha \cdot (T - 20)] = 3.509 \times 10^{-8} \quad \text{Ом*м}$$

Диаметр проводов

$$r_P := \sqrt{\frac{S_P}{\pi}} = 5.499 \times 10^{-3} \quad \text{м} \quad r_N := \sqrt{\frac{S_N}{\pi}} = 3.989 \times 10^{-3} \quad \text{м}$$

$$d_{\text{ins}} := 1.6 \cdot 10^{-3} \quad \text{м} \quad \text{толщина изоляции}$$

геометрия

$$d1 := 2 \cdot (r_P + d_{\text{ins}}) = 0.014 \quad \text{м}$$

$$d2 := (r_N + d_{\text{ins}}) + (r_P + d_{\text{ins}}) = 0.013 \quad \text{м}$$

$$d3 := \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot d1 + \sqrt{d2^2 - 0.25 \cdot d1^2} = 0.023 \quad \text{м}$$

$$d_{PN} := \sqrt[3]{d2^2 \cdot d3} = 0.015 \quad \text{м} \quad \text{между проводами и 4м проводом (тросом)}$$

$$d_{PP} := d1 \quad \text{м} \quad \text{между проводами}$$

$$R_P := \frac{\rho_P}{S_P} \cdot 1000 = 0.369 \quad R_N := \frac{\rho_N}{S_N} \cdot 1000 = 0.702$$

$$f := 50 \quad \text{Гц} \quad \rho_g := 100 \quad \text{Ом*м}$$

$$dR := 10^6 \quad \text{к сопротивлению земли прибавляем большое число (т.е. через землю ток не течет)}$$

$$R_g := \pi^2 \cdot f \cdot 10^{-4} + dR = 1 \times 10^6 \quad D_g := 658.86 \cdot \sqrt{\frac{\rho_g}{f}} = 931.769$$

$$\mu_P := 1 \quad \mu_N := 1$$

Внутренние сопротивления фазного и нулевого провода (int- internal -внутренний)

$$X_{\text{int.P}} := \mu_P \cdot \pi \cdot f \cdot 10^{-4} = 0.016$$

$$X_{\text{int.N}} := \mu_N \cdot \pi \cdot f \cdot 10^{-4} = 0.016$$

$$Z_L := R_P + R_g + i \cdot 0.1447 \cdot \log\left(\frac{D_g}{r_P}\right) + i \cdot X_{\text{int.P}} = 1 \times 10^6 + 0.772i$$

$$Z_{L_N} := R_N + R_g + i \cdot 0.1447 \cdot \log\left(\frac{D_g}{r_N}\right) + i \cdot X_{\text{int.N}} = 1 \times 10^6 + 0.793i$$

$$Z_{m1} := R_g + i \cdot 0.1447 \cdot \log\left(\frac{D_g}{d_{PP}}\right) = 1 \times 10^6 + 0.697i$$

$$Z_{m2} := R_g + i \cdot 0.1447 \cdot \log\left(\frac{D_g}{d_{PN}}\right) = 1 \times 10^6 + 0.692i$$

Сопровитления по формулам "для ВЛ", с учетом исключения нулевого провода (грозотроса) и фактическим исключени тока в земле за счет большого dR

$$Z_1 := Z_L - Z_{m1} = 0.369 + 0.075i \quad \text{Ом/км} \quad \text{сопротивление прямой последовательности}$$

$$Z_0 := Z_L + 2 \cdot Z_{m1} - 3 \cdot \frac{(Z_{m2}^2)}{Z_{LN}} = 2.475 + 0.393i \quad \text{Ом/км} \quad \text{с учетом нулевого провода}$$

$$Z_0' := Z_L + 2 \cdot Z_{m1} = 3 \times 10^6 + 2.166i \quad \text{Ом/км} \quad \text{без учета нулевого провода}$$

### Контроль по формулам "без земли", т.е. когда ток может течь только через нулевой провод

Обозначим

$$X_P := 0.1447 \cdot \log\left(\frac{d_{PN}}{r_P}\right) + X_{\text{int.P}} \quad \text{собственное сопротивление фазного провода в петле фаза-ноль}$$

$$X_N := 0.1447 \cdot \log\left(\frac{d_{PN}}{r_N}\right) + X_{\text{int.N}} \quad \text{собственное сопротивление нулевого провода в петле фаза-ноль}$$

$$X_{mPP} := 0.1447 \cdot \log\left(\frac{d_{PP}}{d_{PP}}\right) \quad \text{взаимное сопротивление петли "фаза1-ноль" и "фаза2-ноль"}$$

$d_{PP}$  - среднее расстояние между фазными проводниками  $r_P$  сопротивление фазы

$d_{PN}$  - среднее расстояние между фазным и нулевым проводом  $r_N$  сопротивление нулевого провода (либо тросом, т.к. формулы одинаковые)

При трехфазном КЗ ток в нулевом проводе не идет. Сопротивление прямой последовательности

$$Z_1 = R_P + i \cdot (X_P - X_{mPP}) \quad \text{сопротивление прямой последовательности}$$

$$Z_{PN} = (R_P + i \cdot X_P) + (R_N + i \cdot X_N) \quad \text{сопротивление контура фаза-нулевой провод}$$

$$Z_{PN} = \frac{2 \cdot Z_1 + Z_0}{3} \quad Z_0 = 3 \cdot Z_{PN} - 2 \cdot Z_1$$

$$Z_0 = 3 \cdot [(R_P + i \cdot X_P) + (R_N + i \cdot X_N)] - 2 \cdot [R_P + i \cdot (X_P - X_{mPP})]$$

$$Z_0 = R_P + X_P \cdot i + 2i \cdot X_{mPP} + 3 \cdot (R_N + i \cdot X_N)$$

### Итоговые сопротивления прямой и нулевой последовательности

Результат идентичен формулам для ВЛ с *большим dR*, *исключаящим путь протекания тока через землю*

*Формулы без земли*

$$Z_1'' := R_P + i \cdot (X_P - X_{mPP}) = 0.369 + 0.075i$$

$$Z_0'' := R_P + X_P \cdot i + i \cdot 2X_{mPP} + 3 \cdot (R_N + i \cdot X_N) = 2.475 + 0.393i$$

$$Z_1 = Z_L - Z_m \quad Z_0 = Z_L + 2 \cdot Z_m$$

$$Z_L = \frac{Z_0 + 2 \cdot Z_1}{3} = \frac{R_P + X_P \cdot i + i \cdot 2X_{mPP} + 3 \cdot (R_N + i \cdot X_N) + 2 \cdot [R_P + i \cdot (X_P - X_{mPP})]}{3}$$

$$Z_L = (R_P + X_P \cdot i) + (R_N + X_N \cdot i)$$

$$Z_m = \frac{Z_0 - Z_1}{3} = \frac{R_P + X_P \cdot i + i \cdot 2X_{mPP} + 3 \cdot (R_N + i \cdot X_N) - [R_P + i \cdot (X_P - X_{mPP})]}{3}$$

$$Z_m = R_N + X_N \cdot i + X_{mPP} \cdot i$$

### Сопротивления фазы и взаимные (все логично и соответствует выносу нулевого провода в фазы)

$$\underline{Z_L} := (R_P + X_P \cdot i) + (R_N + X_N \cdot i) = 1.071 + 0.181i$$

$$Z_m := R_N + X_N \cdot i + X_{mPP} \cdot i = 0.702 + 0.106i$$

## ВЛ (для контроля)

$$X_a := -2 \quad Y_a := 14.5$$

$$X_b := 2 \quad Y_b := 17.5$$

$$X_c := 3.5 \quad Y_c := 14.5$$

$$X_t := 0 \quad Y_t := 20.5$$

$$D_{AB} := \sqrt{(X_a - X_b)^2 + (Y_a - Y_b)^2} = 5$$

$$D_{BC} := \sqrt{(X_b - X_c)^2 + (Y_b - Y_c)^2} = 3.354$$

$$D_{CA} := \sqrt{(X_c - X_a)^2 + (Y_c - Y_a)^2} = 5.5$$

$$D_{At} := \sqrt{(X_a - X_t)^2 + (Y_a - Y_t)^2} = 6.325$$

$$D_{Bt} := \sqrt{(X_b - X_t)^2 + (Y_b - Y_t)^2} = 3.606$$

$$D_{Ct} := \sqrt{(X_c - X_t)^2 + (Y_c - Y_t)^2} = 6.946$$

$$r_{\text{ГП}} := 0.5 \cdot 21.6 \cdot 10^{-3} \quad \text{м} \quad \text{AC 240/39}$$

$$r_{\text{ГР}} := 0.5 \cdot 9.1 \cdot 10^{-3} \quad \text{м} \quad \text{C-50}$$

$$d_{\text{ДН}} := \sqrt[3]{D_{At} \cdot D_{Bt} \cdot D_{Ct}} = 5.411 \quad \text{м}$$

$$d_{\text{ДР}} := \sqrt[3]{D_{AB} \cdot D_{BC} \cdot D_{CA}} = 4.518 \quad \text{м}$$

$$R_{\text{Д}} := 0.1222 \quad \text{Ом/км}$$

$$R_{\text{Н}} := 3.6 \quad \text{Ом/км}$$

$$f := 50 \quad \rho_{\text{гв}} := 100$$

$$R_{\text{г}} := \pi^2 \cdot f \cdot 10^{-4} \quad D_{\text{г}} := 658.86 \cdot \sqrt{\frac{\rho_{\text{г}}}{f}} = 931.769$$

$$\mu_{\text{Д}} := 1 \quad \mu_{\text{Н}} := 44.5$$

$$X_{\text{int.Д}} := \mu_{\text{Д}} \cdot \pi \cdot f \cdot 10^{-4} = 0.016$$

$$X_{\text{int.Н}} := \mu_{\text{Н}} \cdot \pi \cdot f \cdot 10^{-4} = 0.699$$

$$Z_{\text{Л}} := R_{\text{Д}} + R_{\text{г}} + i \cdot 0.1447 \cdot \log\left(\frac{D_{\text{г}}}{r_{\text{ГП}}}\right) + i \cdot X_{\text{int.Д}} = 0.172 + 0.73i$$

$$Z_{\text{ЛН}} := R_{\text{Н}} + R_{\text{г}} + i \cdot 0.1447 \cdot \log\left(\frac{D_{\text{г}}}{r_{\text{ГР}}}\right) + i \cdot X_{\text{int.Н}} = 3.649 + 1.468i$$

$$Z_{\text{м1}} := R_{\text{г}} + i \cdot 0.1447 \cdot \log\left(\frac{D_{\text{г}}}{d_{\text{ДР}}}\right) = 0.049 + 0.335i$$

$$Z_{\text{м2}} := R_{\text{г}} + i \cdot 0.1447 \cdot \log\left(\frac{D_{\text{г}}}{d_{\text{ДН}}}\right) = 0.049 + 0.324i$$

## Сопротивления прямой и нулевой последовательности

$$Z_{\text{Л}} := Z_{\text{Л}} - Z_{\text{м1}} = 0.122 + 0.395i$$

$$Z_{\text{0}} := Z_{\text{Л}} + 2 \cdot Z_{\text{м1}} - 3 \cdot \frac{(Z_{\text{м2}})^2}{Z_{\text{ЛН}}} = 0.334 + 1.348i \quad \text{с исключением грозотроса}$$

$$Z_{\text{0}}' := Z_{\text{Л}} + 2 \cdot Z_{\text{м1}} = 0.27 + 1.4i \quad \text{без грозотроса}$$