

РАСЧЕТ ЭХЗ ВОДОПРОВОДА

Расчёт параметров УКЗ с подпочвенным или глубинным АЗ

Исходные данные

Удельное сопротивление стали трубы	$\rho_T =$	0,245 Ом*мм ² /м
Диаметр трубопровода	$D_T =$	0,800 м
Толщина стенки трубы	$\delta_T =$	10 мм
Среднее удельное сопротивление грунта	$\rho_r =$	50 Ом*м
Глубина укладки трубопровода	$H_T =$	1.5 м
Сопротивление изоляции	$R_{из} =$	100000 Ом*м ²
Срок службы проектируемой УКЗ	$T =$	15 лет
Кэф. изменения сопротивления изоляции во времени	$\gamma =$	0,08 год ⁻¹
Естественный потенциал трубопровода	$U_e =$	-0,55 В
Минимальный защитный потенциал трубопровода	$U_{змин} =$	-0,9 В
Максимальный защитный потенциал трубопровода	$U_{зmax} =$	-1 В
Удельное электрическое сопротивление грунта в поле токов катодной защиты	$\rho_з =$	20 Ом*м
Удельное электрическое сопротивление грунта в месте расположения АЗ	$\rho_{га} =$	10 Ом*м

Длина трубопровода	$L =$	400 м
Тип АЗ	Глубинное АЗ. В коксовой засыпке или в др. наполнителе с выходом торца заземлителя на поверхность земли	
Число электродов в одном анодном заземлителе	$N_a =$	10
Длина одного электрода анода	$L_{a1} =$	1,5 м
Площадь сечения электрода анода	$S_a =$	0,0038 м ²
Масса одного электрода анода	$M =$	40 кг
Удельное электрическое сопротивление материала анода	$\rho_a =$	0,0 Ом*м
Удельное электрическое сопротивление засыпки	$\rho_z =$	600 Ом*м
Диаметр засыпки	$D_a =$	0,3 м
Среднее удельное электрическое сопротивление грунта по глубине скважины	$\rho_{гс} =$	100 Ом*м
Коэффициент неоднородности	$K =$	5
Длина заземлителя грунта по глубине скважины	$l_z =$	15 м
Масса одного заземлителя	$M =$	400 кг
Расстояние между двумя заземлителями	$a =$	2,25 м
Количество анодных заземлителей	$N_a =$	5
Диаметр заземлителя (электрода)	$d_a =$	0,07 м
Скорость растворения заземлителя	$q =$	0,3 кг/А*год
Глубина (до середины заземлителя)	$h =$	7,5 м
Эмпирический коэффициент b	$b =$	0,41
Эмпирический коэффициент c	$c =$	0,17
Эмпирический коэффициент f	$f =$	0,83

Расчет (методология)

Расчет электрических параметров ВОДОПРОВОДА:

а) продольное сопротивление трубопровода R_T , Ом/м, рассчитывают по формуле:

$$R_T = \frac{\rho_T}{\pi \cdot (D_T \cdot 10^3 - \delta_T) \cdot \delta_T} = \frac{0,245}{\pi \cdot (0,800 \cdot 10^3 - 10) \cdot 10} = 9,87 \cdot 10^{-6} \text{ Ом/м} \quad (8.1)$$

где ρ_T – удельное сопротивление материала трубы, Ом·мм²/м (принимается равным 0,245 Ом·мм²/м);

D_T – диаметр трубопровода, м;

δ_T – толщина стенки трубопровода, мм.

б) сопротивление окружающего трубу грунта (R_p , Ом·м) (сопротивление растеканию трубопровода) определяют по следующему выражению:

$$R_p = \frac{\rho_r}{2\pi} \ln \frac{0,4\pi R_p}{D_T H_T R_T} = \frac{50}{2 \cdot \pi} \ln \frac{0,4\pi R_p}{0,800 \cdot 1,5 \cdot 9,87 \cdot 10^{-6}} = 130,88 \text{ Ом·м} \quad (8.2)$$

где H_T – глубина залегания (до оси) трубопровода, м;

ρ_r – среднее удельное электрическое сопротивление грунта, Ом·м, вычисляемое по формуле:

$$\rho_r = L_3^2 \left(\sum_{i=1}^n \frac{L_i}{\sqrt{\rho_i}} \right)^{-2} = 50 \text{ Ом·м} \quad (8.3)$$

где L_3 – длина защитной зоны, м;

L_i – длина i -го участка с удельным электрическим сопротивлением ρ_i , м;

n – количество участков грунта.

Выражение (8.2) является трансцендентным и решается методом итераций.

в) сопротивление изоляции трубопровода на срок эксплуатации t , год, рассчитывается по следующей зависимости:

$$R_{из}(t) = R_{из} \cdot e^{-\gamma t} \quad (8.4)$$

$$R_{из}(15) = 100000 \times e^{-0.08 \cdot 15} = 30119 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$$

где $R_{из}(t)$ – сопротивление изоляции в момент времени эксплуатации t , год, $\text{Ом} \cdot \text{м}^2$;
 $R_{и}$ – начальное сопротивление изоляции трубопровода, $\text{Ом} \cdot \text{м}^2$, выбирается из
 з
 таблицы 7.3;

γ – коэффициент, характеризующий скорость изменения сопротивления
 изоляции во времени, 1/год, определяется по таблице 7.3.

г) постоянную распространения тока, α_T , 1/м, вдоль трубопровода при удельном
 электрическом сопротивлении грунта менее 50 $\text{Ом} \cdot \text{м}$ определяют по формуле:

$$\alpha_T = \sqrt{\frac{\pi D_T R_T}{R_{из}(t)}} = \sqrt{\frac{\pi \cdot 0.800 \cdot 9.87 \cdot 10^{-6}}{30119}} = 2,85 \cdot 10^{-5} \text{ 1/м} \quad (8.5)$$

при удельном электрическом сопротивлении грунта более 50 $\text{Ом} \cdot \text{м}$.

$$\alpha_T = \sqrt{\frac{R_T}{\frac{R_{из}(t)}{\pi D_T} + R_p}} \quad (8.6)$$

д) входное сопротивление трубопровода, Z_T , Ом , определяют по формуле:

$$Z_T = 0,5 \sqrt{R_T R_{п}} \text{cth}(0,5 \alpha_T L_3) = 0,5 \sqrt{9.87 \cdot 10^9 \cdot 12121} \text{cth}(0,5 \cdot 2,85 \cdot 10^{-5} \cdot 400) = 0,173 \text{ Ом} \quad (8.7)$$

где L_3 – длина защитной зоны, м; cth
 – гиперболический котангенс.

$$R_{п} = \frac{R_{из}}{\pi D_T} + R_p = \frac{30119}{\pi \cdot 0.800} + 130,88 = 12121,00 ;$$

е) если точка дренажа разделяет трубопровод на плечи с различными электрическими
 параметрами, то входное сопротивление правого ($Z_{пр}$, Ом) и левого ($Z_{лев}$, Ом) плеч
 трубопровода будут соответственно равны:

$$Z_{np} = \sqrt{R_{m(np)} R_{n(np)}} \text{cth}(\alpha_T L_{np}) \quad (8.8)$$

$$Z_{лев} = \sqrt{R_{т(лев)} R_{п(лев)}} \operatorname{cth}(\alpha_T L_{лев}) \quad (8.9)$$

где $R_{т(пр)}$ и $R_{т(лев)}$ – продольное сопротивление соответственно правого и левого плеч трубопровода, Ом/м;

$R_{п(пр)}$ и $R_{п(лев)}$ – переходное сопротивление на единицу длины МН, соответственно правого и левого плеч трубопровода, Ом*м;

$L_{пр}$ и $L_{лев}$ – длина соответственно правого и левого плеч трубопровода, м.

Входное сопротивление трубопровода, Z_T , Ом, в этом случае определяется выражением:

$$Z_T = \frac{Z_{пр} Z_{лев}}{Z_{пр} + Z_{лев}} \quad (8.10)$$

Расчет установок катодной защиты с подпочвенными и глубинными анодными заземлениями

а) длину защитной зоны (L_z , м) одной УКЗ на конечный период эксплуатации находят по формуле:

$$L_z = \frac{2}{\alpha_T} \ln \frac{2\pi Z_T y}{0,5 \left(U_e - U_{змин} \right) \left(2\pi Z_T y + \rho_z \right) - \frac{4\rho_z y}{L_z}} = \frac{2}{2,85 \cdot 10^{-5}} \ln \frac{2\pi \cdot 0,173 \cdot 50}{0,5 \left(-0,55 - (-0,9) \right) \left(2\pi \cdot 0,173 \cdot 50 + 20 \right) - \frac{4 \cdot 20 \cdot 50}{L_z}} = 20793,791 \text{ м} \quad (8.11)$$

где $U_{змин}$ – минимальный защитный потенциал, В*;

$U_{змак}$ – максимальный защитный потенциал, В;

y – расстояние между трубопроводом и анодным заземлением, м;

ρ_z – удельное электрическое сопротивление земли в поле токов катодной защиты, Ом*м;

U_e – естественный потенциал трубопровода, В. Определяется по данным изысканий или принимается равным минус 0,55 В по МСЭ;

б) расстояние между трубопроводом и анодным заземлением (кроме протяженного) y , м, определяют по формуле:

$$y = \frac{P}{Z_T} = \frac{6,57}{0,173} = 38,0 \text{ м} \quad (8.12)$$

где P – коэффициент, определяемый по формуле:

$$P = \frac{0,56 + 0,26\rho_3 + 0,0014\rho_3^2}{1 + 0,11\rho_3 + 0,00039\rho_3^2} = \frac{0,56 + 0,26 \cdot 20 + 0,0014 \cdot 20^2}{1 + 0,11 \cdot 20 + 0,00039 \cdot 20^2} = 6,57 \quad (8.13)$$

где ρ_3 – удельное сопротивление земли в поле токов катодной защиты, Ом*м; Z_T – входное сопротивление трубопровода, Ом, определенное на конечный период эксплуатации данной УКЗ;

В соответствии с РД-91.020.00-КТН-149-06 расстояние от сосредоточенного АЗ до ближайшего защищаемого сооружения должно быть не менее 200 м.

Для глубинного АЗ это расстояние должно быть не менее 50 м

в) силу тока катодной установки, I_3 , А, определяют на начальный и конечный периоды эксплуатации из выражения:

$$I_3 = 1,3(U_e - U_{з\max}) / \left(Z_T + \frac{\rho_3}{2\pi y} \right) = 1,3(-0,55 - (-1)) / \left(0,173 + \frac{20}{2\pi \cdot 50} \right) = 2,47 \text{ А} \quad (8.14)$$

г) напряжение на выходе катодного преобразователя, V , В, вычисляют по формуле:

$$V = 1,3I_3(Z_T + R_a + R_{np}) = 1,3 \cdot 2,47(0,173 + 12,96 + 0,00) = 48,96 \text{ В} \quad (8.15)$$

где I_3 – сила тока катодной установки, А, определяемая на конечный период эксплуатации;

R_a – переходное сопротивление АЗ, Ом;

$$R_{np} = \rho_{np} \frac{y + y_c}{S} \quad (8.16)$$

где y_c – длина спусков провода с опор к катодной станции, анодному заземлению и трубопроводу, м;

S – сечение провода дренажной линии, мм²;

ρ_{np} – удельное электрическое сопротивление провода, Ом*мм²/м;

ρ
 R_{np} – сопротивление дренажных проводов, соединяющих катодную станцию с трубопроводом и АЗ, Ом;

д) мощность на выходе катодного преобразователя, W , Вт, определяют по формуле:

$$W = I_3 V = 2,47 \cdot 48,96 = 121,0 \text{ Вт} \quad (8.17)$$

е) выбор средств катодной защиты производится в соответствии с результатами расчета защитного тока и напряжения на выходе. При этом

необходимо увеличить ток и напряжение на 30%. При прокладке трубопровода в грунтах высокой коррозионной агрессивности необходимо дополнительно увеличить силу защитного тока и напряжение на выходе катодного преобразователя на 50% для обеспечения резервирования катодных установок. В соответствии с расчетными значениями защитного тока и напряжения выбирают тип катодного преобразователя.

Расчет подпочвенных и глубинных анодных заземлений, основными параметрами которых являются сопротивление растеканию и срок службы:

а) подпочвенное анодное заземление:

1) сопротивление растеканию заземлителя, $R_{з1}$, Ом, при вертикальном расположении:

$$R_{з1} = \frac{\rho_z}{2\pi l_a} \left(\ln \frac{2l_a}{d_a} + \frac{1}{2} \ln \frac{4h+l_a}{4h-l_a} \right) \quad (8.18)$$

где ρ_r – удельное электрическое сопротивление грунта, Ом·м

l_a - длина электрода заземлителя, м;

d_a - диаметр электрода заземлителя, м;

h - глубина (до середины заземлителя) заложения электрода, м;

2) Сопротивление растеканию заземлителя, $R_{з1}$, Ом, при горизонтальном расположении и при $l_a \geq 3h$:

$$R_{з1} = \frac{\rho_z}{2\pi l_a} \left(\ln \frac{2l_a}{d_a} + \ln \frac{l_a + \sqrt{l_a^2 + 16h^2}}{4h} \right) \quad (8.19)$$

где h - глубина заложения электрода, м.

3) сопротивление растеканию заземлителя $R_{з1}$, Ом, при горизонтальном расположении и при $l_a < h$

$$R_{з1} = \frac{\rho_z}{2\pi l_a} \ln \frac{2l_a}{d_a} \quad (8.20)$$

4) срок службы, Т, год, подпочвенных АЗ, соединенных параллельно, для

горизонтального и вертикального расположения электродов рассчитываем по формуле:

$$T = \frac{M k N_a}{q I_{зср}} \quad (8.21)$$

где M – масса анодного заземлителя, кг;

k – коэффициент запаса ($k = 0.8$);

q – электрохимический эквивалент материала анода, кг/А×год (по данным п. 16.2);

N_a – число заземлителей.

5) Сопротивление растеканию подпочвенного АЗ $R_з$, Ом, равно:

$$R_з = \frac{R_{з1}}{N_a \eta_э} = \frac{16.43}{5 \cdot 0.253} = 12.963 \text{ Ом} \quad (8.22)$$

где $R_{з1}$ – сопротивление растеканию одиночного анодного заземлителя, Ом; $\eta_э$ – коэффициент экранирования, рассчитываемый по формуле:

$$\eta_э = b + \frac{f}{N_a} + c \ln \frac{a}{l_a} = 0.41 + \frac{0.83}{5} + 0.17 \ln \frac{2.25}{15} = 0.253 \quad (8.23)$$

где b, c, f – эмпирические коэффициенты (таблица 8.1);

a – расстояние между электродами, м.

Таблица 8.1

Коэффициенты для расчета эффекта экранирования

Параметры анодного заземлителя	b	c	f
Вертикальный в коксовой засыпке ($l_a = 1,4$ м, $d_a = 0,185$ м, $h = 1,7$ м)	0,41	0,17	0,83
Горизонтальный в коксовой засыпке ($l_a = 1,4$ м; $d_a = 0,185$ м; $h = 1,7$ м)	0,49	0,15	0,71
Вертикальный ($l_a = 3,0$ м; $d_a = 0,1$ м; $h = 1,5$ м)	0,41	0,19	0,76
Горизонтальный ($l_a = 3,0$ м; $d_a = 0,1$ м; $h_a = 1,5$ м)	0,36	0,18	0,80

б) Глубинное анодное заземление (из трубных и свайных конструкций или

последовательно соединенных одиночных заземлителей в скважине):

1) сопротивление растеканию анодного заземлителя в коксовой засыпке или в другом наполнителе с выходом торца заземлителя на поверхность земли, $R_{з1}$, Ом:

$$R_{з1} = \frac{l_a \rho_a}{2S_a} + \frac{\rho_z}{2\pi l_a} \left(\ln \frac{4l_a}{d_a} + \frac{\rho_{кз}}{\rho_z} \ln \frac{d_z}{d_a} \right) = \frac{15 \cdot 0}{2 \cdot 0.004} + \frac{100}{2\pi \cdot 15} \left(\ln \frac{4 \cdot 15}{0.07} + \frac{600}{100} \ln \frac{0.3}{0.07} \right) = 16.43 \text{ Ом} \quad (8.24)$$

$$l_a \approx N_a l_{a1} = 10 \cdot 1.5 = 15 \text{ м} \quad (8.25)$$

где N_a – число анодов в одном анодном заземлителе;

l_{a1} – длина одного анодного заземлителя, м;

$\rho_{гс}$ – среднее удельное электрического сопротивление грунта по глубине скважины, Ом·м, определяемое как:

$$\rho_{гс} = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{\sum_{i=1}^n \frac{l_i}{\rho_{гi}}} = 100 \text{ Ом·м} \quad (8.26)$$

где l_i – длина i -го участка с удельным электрическим сопротивлением $\rho_{гi}$, м; n – количество участков грунта по глубине скважины с удельным электрическим сопротивлением $\rho_{гi}$.

$\rho_{кз}$ – удельное электрическое сопротивление засыпки, Ом·м;

ρ_a – удельное электрическое сопротивление анодного материала, Ом·м;

d_a – диаметр анода, м;

d_z – диаметр засыпки, м;

S_a – площадь сечения электрода анода, м²;

2) сопротивление растеканию анодного заземлителя в коксовой засыпке или в другом наполнителе без выхода торца на поверхность земли в коксовой засыпке или в другом наполнителе:

$$R_{з1} = \frac{l_a \rho_a}{2S_a} + \frac{\rho_z}{2\pi l_a} \left(\ln \frac{4l_a}{d_a} + \frac{1}{2} \ln \frac{4h+l_a}{4h-l_a} + \frac{\rho_z}{\rho_z} \ln \frac{d_z}{d_a} \right) \quad (8.27)$$

где h – расстояние от поверхности земли до середины заземлителя, м.

3) сопротивление растеканию анодного заземления $R_{з3}$, Ом, составленного из $N_{аз}$ анодных заземлителей, соединенных параллельно, определяют по формуле:

$$R_{з} = \frac{R_{з1}}{N_{аз} \eta_{э}} \quad (8.28)$$

где $R_{з1}$ – сопротивление растеканию одного анодного заземлителя, Ом; $\eta_{э}$ – коэффициент экранирования (формула 8.24);

4) срок службы глубинного анодного заземления T , год, состоящего из $N_{аз}$ анодных заземлителей, соединенных параллельно, рассчитывают по формуле:

$$T = \frac{M_{з1} k N_{аз}}{q I_{зср} k_{г}} \quad (8.29)$$

где $M_{з1}$ – масса одного анодного заземлителя, кг;

$$M_{з1} = N_{а} \cdot M_{а}$$

где $M_{а}$ – масса одного анода;

k – коэффициент запаса ($k = 0,8$);

q – электрохимический эквивалент материала анода, кг/А*год;

Если расчетный период эксплуатации меньше требуемого, то количество анодных заземлителей $N_{з}$ необходимо увеличить.

$k_{г}$ – коэффициент неоднородности грунта по глубине скважины, определяемый по формуле:

$$k_{г} = \frac{l_{а}}{c_{k} \sum_{i=1}^n \frac{l_{ai}}{\rho_{гi}}} \quad (8.30)$$

где l_{ai} – длина рабочей части заземлителя, находящейся в i -ом слое грунта, м; $\rho_{гi}$ – удельное электрическое сопротивление i -го слоя грунта, Ом*м;

$\rho_{гk}$ – удельное электрическое сопротивление k -го слоя грунта, имеющего наименьшее сопротивление из n слоев, Ом*м;

l_{ak} – длина заземлителя, находящейся в k -ом слое грунта, м;

n – число слоев грунта с различным удельным электрическим

сопротивлением, пересекаемых глубинным анодным заземлением.

Результаты расчета параметров ВОДОПРОВОДА

Продольное сопротивление трубопровода	$R_T = 9.87 \cdot 10^{-6}$ Ом/м
Сопротивление растеканию трубопровода	$R_p = 130.875$ Ом*м
Сопротивление изоляции трубопровода на конечный срок эксплуатации	$R_{из} = 30119.421$ Ом*м ²
Постоянная распространения тока на конечный срок эксплуатации	$\alpha_T = 2.85 \cdot 10^{-5}$ 1/м
Входное сопротивление трубопровода на конечный срок эксплуатации	$Z_T = 0.173$ Ом

Результаты расчета ИПКЗ-РА, ИПКЗ-М-РА и В-ОПЕ-М

Расстояние между трубопроводом и АЗ	$Y = 50$ м
Длина защитной зоны одной УКЗ на конечный год эксплуатации	$L_3 = 20793.791$ м
Сила тока катодной установки	$I_3 = 2,47$ А
Напряжение на выходе УКЗ	$V = 48,96$ В
Требуемая мощность УКЗ	$W = 121,0$ Вт

Результаты расчета АЗ

Сопротивление растеканию 1-го анодного заземлителя	$R_{31} = 16.43$ Ом
Сопротивление растеканию сосредоточенного АЗ	$R_3 = 12.963$ Ом
Срок службы сосредоточенного АЗ	$T = 222.251$ лет

Рекомендуемое оборудование



1 выпрямитель В-ОПЕ-42-24-У1ТУ 3415-007-73892839-2006.

Управление выпрямителем может осуществляться:

- по интерфейсу «токовая петля 4-20 мА»
- по интерфейсу RS-485 «ModBus RTU»
- по каналу GSM/GPRS



СКЗ ИПКЗ-РА-1.0, или ИПКЗ-М-РА-1.0ТУ 3415-011-73892839-2011.

Возможно подключение адаптеров телеметрии с интерфейсами: RS-485 «ModBus RTU», GSM/GPRS.

Проектировщик Фукс Андрей jorgeadan1958@gmail.com