50 години Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски"
Годишник, том 46, свитък III, Механизация, електрификация и автоматизация на мините, София, 2003, стр.

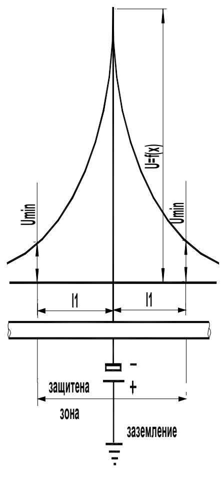
РАЗПРЕДЕЛЕНИЕ НА ТОКА ПО ДЪЛЖИНАТА НА ЗАЩИТАВАНО ПОДЗЕМНО СЪОРЪЖЕНИЕ ОТ ПОЧВЕНА И ЕЛЕКТРИЧЕСКА КОРОЗИЯ ПРИ ИЗПОЛЗВАНЕ НА КАТОДНА ЗАЩИТА

С.Стефанов
Минно-геоложки университет
"Св.Иван Рилски"
София 1700, България

И.Милев
Минно-геоложки университет
"Св.Иван Рилски"
София 1700, България

РЕЗЮМЕ
Разгледана е опростена схема на катодна защита. За да се изчисли мощността на захранващия източник на катодната станция е необходимо да се знаят максималния потенциал на защитавания обект по неговата дължина и тока в дренажната верига на защитата.
Изведени са зависимости, определящи изменението на потенциала и разпределението на тока в случаите на защитаван обект с безкрайна и крайна дължина.

Една от най-използваните системи за защита на подземни метални съоръжения от корозия е катодната защита. (Волотковский и др., 1964, Профферансов и др., 1968.) Основен проблем при изграждането на такава защита е определянето на мощността на захранващия източник на катодната станция. За целта е необходимо да се знаят защитният потенциал по дължината на защитавания обект и токът в дренажната верига на защитата.

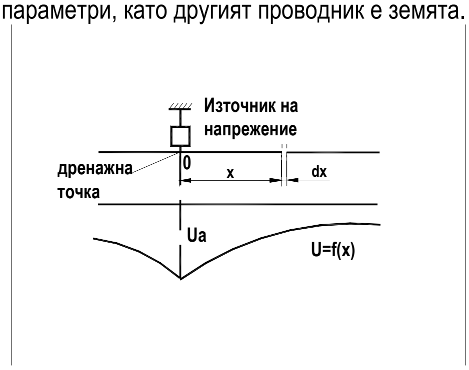


фигура 1

При големи дължини на защитаваното съоръжение, например подземен тръбопровод, определянето на потенциала е трудно, тъй като той се изменя по дължината на линията, намалявайки от дренажната точка към краищата на тръбопровода. При това изменението на потенциала зависи от разположението на катодната станция т.е. дали тя действа самостоятелно или в близост до нея съществуват и други катодни станции.

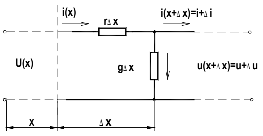
В първия случай, когато катодната станция действа самостоятелно потенциалът по дължината на тръбопровода се разпределя по експоненциален закон.

На фиг. 1 е показано разпределението на потенциала по тръбопровод с безкрайна дължина. В близост до дренажната точка потенциалът рязко намалява, образувайки "пик", а след това се изменя по експонента клонейки към нулева стойност теоретично в безкрайността. Защитаваният тръбопровод с безкрайна дължина може да се разглежда като двупроводна линия с разпределени параметри, като другият проводник е земята.



фигура 2

При изследване на изменението на потенциала и на тока по дължината на тръбопровода се приема, че защитната изолация на тръбопровода е с високи диелектрични свойства, еднакви по цялата му дължина и че общото съпротивление на участъка, през който протича тока през почвата е много малко и се пренебрегва. Ако се разгледа един елементарен участък от линията dx, намиращ се на разстояние x от дренажната точка, считана за начало на линията (фиг. 2), поради безкрайно малката му дължина се приема, че параметрите които го характеризират са съсредоточени. В такъв случай линията може да се представи като съставена от безкрайно голям брой звена с дължина $\Delta x \approx dx$ С.Стефанов (1997). На фиг. 3 са показани две точки от линията с координати x и $x + \Delta x$, като напреженията и токовете за тези точки са $u(x)$, $u(x + \Delta x)$, $i(x)$, $i(x + \Delta x)$.



фигура 3

За даден момент от време t, токовете и напреженията имат посоките, показани на фиг. 3. Напрежението по дължината на линията се изменя, поради пада от тока в съпротивлението r (индуктивността на линията се пренебрегва). Токът не остава неизменен поради наличието по дължината на линията на утечки през проводимостта g (утечките през капацитета C на тръбопровода спрямо земя се пренебрегват). Тогава, използвайки законите на Кирхоф се записва

$u = ri\Delta x + u + \Delta u$

и $i = gu\Delta x + g\Delta u.\Delta x + i + \Delta i$.

Но $g\Delta u.\Delta x \approx 0$. Следователно

$\Delta U = -ri\Delta x$

и $\Delta I = -gU\Delta x$.

Като се положи $\Delta U \approx dU$ и $\Delta I \approx dI$ получава се

$$\frac{dU}{dx} = -rI \tag{1}$$

и
$$\frac{dI}{dx} = -gU, \tag{2}$$

където I е токът в точката x на линията, A;

U - потенциалът в точката x на линията спрямо земя, V;

g - проводимостта на изолацията на единица дължина на тръбопровода, S/m;

r - съпротивлението на тръбата на единица дължина, Ω /m;

x - разстоянието от точката на дренажа до разглежданото сечение, m.

След диференциране на (1) и (2) спрямо Δx получава се

$$\frac{d^2U}{dx^2} = -r\frac{dI}{dx} \tag{3}$$

и
$$\frac{d^2I}{dx^2} = -g\frac{dU}{dx}. \tag{4}$$

Като се замести (1) в (3) и (2) в (4) получава се

$$\frac{d^2U}{dx^2} = -r\frac{dI}{dx} = -r(-g)U = rgU, \tag{5}$$

и
$$\frac{d^2I}{dx^2} = -g\frac{dU}{dx} = -g(-r)I = grI. \tag{6}$$

Уравнения (5) и (6) са обикновени хомогенни диференциални уравнения от втори ред с постоянни коефициенти, еднакви за потенциала и за тока.

Характеристичното уравнение за потенциала и за тока е едно и също $\rho^2 - rg = 0,$ откъдето корените му $\rho_{1,2} = \pm\sqrt{rg}$, т.е.

$$\rho = \rho_1 = -\rho_2 = \sqrt{rg} \tag{7}$$

Следователно общото решение на уравнения (5) и (6) има вида:

$$U = A_1e^{\rho x} + A_2e^{-\rho x} \tag{8}$$

и
$$I = B_1e^{\rho x} + B_2e^{-\rho x}. \tag{9}$$

В зависимост от граничните условия решенията на уравнения (8) и (9) получават различни форми.

Разглеждат се два основни случая:

а) Разпределение на потенциала и на тока в участък с безкрайна дължина;

б) Разпределение на потенциала и на тока в участък с крайна дължина.

В първия случай, когато участъка от линията е с безкрайна дължина граничните уславия са:

За $x = 0$, токът $I = I_A$, а потенциалът $U = U_A$;

За $x = \infty$, токът $I = 0$, а потенциалът $U = 0$.

Тогава $U(x = 0) = U_A = A_1 + A_2$

и
$$U(x = \infty) = 0 = A_1e^{\infty} + A_2e^{-\infty}. \tag{10}$$

Тъй като $e^{-\infty} = 0$, то от уравнение (10) следва, че $A_1 = 0$. Следователно $A_2 = U_A$, а

$$U = A_2e^{-\rho x} = U_Ae^{-\rho x}. \tag{11}$$

Токът $I(x=0) = I_A = B_1 e^{\rho x} + B_2 e^{-\rho x}$, (12)

а $I(x=\infty) = 0 = B_1 e^{\infty} + B_2 e^{-\infty}$. (13)

От (12) следва, че $B_1 = 0$, а $B_2 = I_A$.

Следователно $I = B_2 e^{-\rho x} = I_A e^{-\rho x}$. (14)

Необходимо е да се напомни, че I_A е стойността на тока, връщащ се по тръбата към дренажната точка, само от едната му страна, а U_A е потенциалът между тръбата и земя в дренажната точка, т.е. това е максималният защитен потенциал.

След диференциране на уравнение (11) то добива вида

$$\frac{dU}{dx} = -\rho U_A e^{-\rho x}. \quad (15)$$

Като се замести (15) в (1) получава се

$$-\rho U_A e^{-\rho x} = -rI. \quad (16)$$

За $x = 0$, $I = I_A$ и $e^{-\rho x} = 1$. Тогава от (16) следва,

че $\rho U_A = rI_A$, (17)

откъдето $\dfrac{U_A}{I_A} = \dfrac{r}{\rho}$. (18)

Цялото ефективно съпротивление на тръбопровода от едната страна на дренажната точка r_o се определя с израза:

$$r_o = \frac{r}{\sqrt{rg}} = \frac{U_A}{I_A} = \sqrt{\frac{r}{g}}. \quad (19)$$

Ако с $l_1 = \dfrac{L}{2}$ се означи дължината на участъка от едната страна на дренажната точка, а с $U_{\min}$ минималния защитен потенциал в най-отдалечената точка на участъка на разстояние l_1 от дренажната точка, от (11) и (14) се получава съответно

$U_A = U_{\min} e^{\rho l_1}$ (20)

и $I_A = I e^{\rho l_1}$. (21)

Във втория случай, когато участъкът е с крайна дължина разпределението на потенциала е показано на фиг. 4.

В този случай граничните условия са:

За $x = 0$, $I = I_A$ и $U = U_A$;

За $x = l_2$, $I = 0$ и $\dfrac{dU}{dx} = 0$.

Последното условие произтича от наличието на симетрия. Като се вземат предвид посочените гранични условия от уравнение (9) се получава:

$I_A = B_1 + B_2$ (22)

и $0 = B_1 e^{\rho l_2} + B_2 e^{-\rho l_2}$. (23)

След съвместно решаване на уравнения (22) и (23) и след сумиране получава се:

$$\begin{aligned} B_2 &= I_A - B_1, \text{ и} \\ 0 &= B_1 e^{\rho l_2} + (I_A - B_1)e^{-\rho l_2} = \\ &= B_1\left(e^{\rho l_2} - e^{-\rho l_2}\right) + I_A e^{-\rho l_2}, \end{aligned} \quad (24)$$

откъдето $B_1 = -\dfrac{I_A e^{-\rho l_2}}{e^{\rho l_2} - e^{-\rho l_2}}$, а

$$\begin{aligned} B_2 &= I_A - B_1 = I_A\left[1 + \frac{e^{-\rho l_2}}{e^{\rho l_2} - e^{-\rho l_2}}\right] = \\ &= I_A \frac{e^{\rho l_2}}{e^{\rho l_2} - e^{-\rho l_2}}. \end{aligned} \quad (26)$$

След заместване на B_1 и B_2 в уравнение (9) се получава:

$$\begin{aligned} I &= -\frac{I_A e^{-\rho l_2}}{e^{\rho l_2} - e^{-\rho l_2}} e^{\rho x} + \frac{I_A e^{\rho l_2}}{e^{\rho l_2} - e^{\rho l_2}} e^{-\rho x} = \\ &= I_A \frac{e^{\rho(l_2 - x)} - e^{-\rho(l_2 - x)}}{e^{\rho l_2} - e^{-\rho l_2}}. \end{aligned} \quad (27)$$

Като се вземе предвид ,че $\dfrac{e^m - e^{-m}}{2} = sh(m)$ (28)

и $\dfrac{e^m + e^{-m}}{2} = ch(m)$

(29)

за удобство при използване, израз (27) се представя във вида:

$$I = I_A \frac{sh[\rho(l_2 - x)]}{sh(\rho l_2)}. \quad (30)$$

За определяне на коефициентите A_1 и A_2 се диференцира уравнение (8) по x или

$$\frac{dU}{dx} = A_1 \rho e^{\rho x} - A_2 \rho e^{-\rho x}. \quad (31)$$

Като се заместят граничните условия в уравнение (8) (за $x = 0, U = U_A$) и в уравнение (31)

(за $x = l_2, \dfrac{dU}{dx} = 0$), получава се :

$U_A = A_1 + A_2$, (32)

и $0 = \rho A_1 e^{\rho l_2} - \rho A_2 e^{-\rho l_2}$. (33)

След съкращаване на ρ от (33) следва

$$0 = A_1 e^{\rho l_2} - A_2 e^{-\rho l_2} \quad . \tag{34}$$

След съвместно решаване на уравнения (32) и (34) за коефициентите A_1 и A_2 се получава:

$$A_1 = \frac{U_A e^{-\rho l_2}}{e^{\rho l_2} + e^{-\rho l_2}}, \tag{35}$$

$$A_2 = \frac{U_A e^{\rho l_2}}{e^{\rho l_2} + e^{-\rho l_2}} \, . \tag{36}$$

Като се вземат предвид (28), (29), (35) и (36) от израза (8) се получава:

$$U = U_A \frac{e^{-\rho l_2} e^{\rho x}}{e^{\rho l_2} + e^{-\rho l_2}} + U_A \frac{e^{\rho l_2} e^{\rho x}}{e^{\rho l_2} + e^{-\rho l_2}} = \\ = U_A \frac{ch[\rho (l_2 - x)]}{ch(\rho l_2)}. \tag{37}$$

След дефеоринциране на (37) получава се:

$$-\frac{dU}{dx} = U_A \frac{\rho\, sh[\rho (l_2 - x)]}{ch(\rho l_2)} \, . \tag{38}$$

От изрази (1) и (38) се получава:

$$rI = \frac{U_A}{ch(\rho l_2)} . \rho\, sh[\rho (l_2 - x)]. \tag{39}$$

Като се вземе предвид, че за дренажната точка $x = 0$ и $I = I_A$, а така също $\frac{sh(\rho l_2)}{ch(\rho l_2)} = th(\rho l_2)$, то уравнение (39) приема вида:

$$\frac{U_A}{I_A} = \frac{r}{\rho} . \frac{1}{th(\rho l_2)} = r_o \, , \tag{40}$$

където r_o е стойността на съпротивлението на участъка от единия край до дренажната точка.

Тъй като $\frac{r}{\rho} = \frac{r}{\sqrt{rg}} = \sqrt{\frac{r}{g}}$, (41)

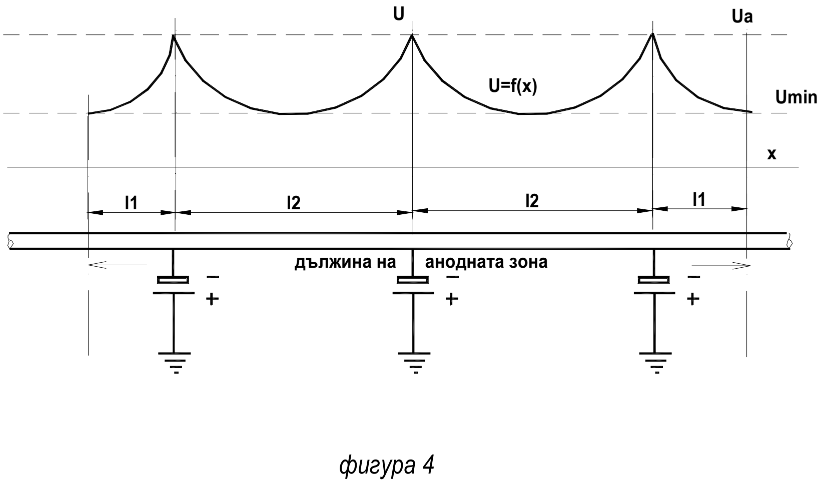
то $r_o = \frac{U_A}{I_A} = \sqrt{\frac{r}{g}} . \frac{1}{th(\rho l_2)}$. (42)

Потенциалът между две катодни станции с крайна дължина (фиг. 4), придобива максимална стойност за $x = l_2$. В този случай изразът (37) приема вида:

$$U_{\min} = U_A \frac{ch[\rho (l_2 - l_1)]}{ch(\rho l_2)} \tag{43}$$

Но $ch0 = 1$, следователно

$$\frac{U_A}{U_{\min}} = ch(\rho l_2). \tag{44}$$



фигура 4

Към доклада могат да бъдат направени следните изводи:

Предлага се метод за изследване на изменението
на потенциала и на тока по дължината на защитавано подземно съоръжение от корозия при използване на катодна защита въз основа на теорията на линии с разпределени параметри.

Изведени са зависимости, определящи изменението на потенциала и разпределението на тока в случаите на защитаван обект с базкрайна и крайна дължина, които служат като основа при проектирането на катодните защити.

Л и т е р а т у р а:

Волотковский С.А., Е.В.Василевский, Э.М.Гутман, 1964. Защита подземных сооружений от электрокоррозии, *изд.”Техника”, Киев*.

Проферансов В.П., П.Н.Лебедев, 1968. Защита подземных сооружений от коррозии, *изд.Литературы по строительство, М.*

Стефанов С.А. 1997. Теоретични основи на електротехниката, ч.II, *МГУ “Св.Иван Рилски” .*

Препоръчана за публикуване от

катедра “Електрификация на мините ”, МЕМФ

ELECTRICITY DISTRIBUTION ALONG THE UNDERGROUND EQUIPMENT PROTECTED AGAINST SOIL AND ELECTRIC CORROSION BY A CATHODE PROTECTION USE

S. Stefanov

University of Mining and Geology
"St. Ivan Rilski"
Sofia 1700, Bulgaria

Iv.Milev

University of Mining and Geology
"St. Ivan Rilski"
Sofia 1700, Bulgaria

ABSTRACT

A simplified cathode protection diagram is considered. In order the cathode station feeding source power to be estimated the protected object maximal potential along its length and the current in the protection drainage circuit have to be known. Dependences defining the current potential and distribution in cases of protected object with limited and endless length are worked out.