



A XVI-a Conferință internațională – multidisciplinară
„Profesorul Dorin PAVEL – fondatorul hidroenergeticii românești”
SEBEȘ, 2016

APROXIMAREA ECUAȚIEI DE REZOLVARE A SITUAȚIEI CABLURILOR ELECTRICE AERIENE UTILIZÂND METODA ITERATIVĂ ȘI PROGRAMAREA C++

Feras MAHFOUD, Damian TIMOFTE, Moutasem ALKHATIB

SOLVE THE APPROXIMATE SOLUTION FOR THE STATATMENT EQUATION OF OVER HEAD LINES BY USING ITTERATIVE METHOD AND C++

The calculation of different parameters for mechanical design of overhead lines is introduced in this paper. The solution of the equation statement is done by using iteration methods and c++. Finally, the purpose of this paper is to realize the optimum design of overhead lines and consequently the better performance during different weather conditions and load cases.

Key words: overhead lines, mechanical design, sag, equation statement

Cuvinte cheie: linii electrice aeriene, proiectare mecanică, săgeți, ecuație de stare

1. Introducere

Pentru determinarea solicitărilor mecanice și a săgeților conductoarelor la schimbarea condițiilor climatice (căldură - vânt – zăpadă - încărcare), trebuie să găsim o relație matematică ce include toate aceste valori, iar această formulă se numește ecuația de bază a stării conductorului. Cercetarea noastră se va limita doar la deschiderea izolată dintre doi stâlpi, care au suspendate puncte fixe articulare și la care nu există nici o posibilitate de deplasare liniară sub influența unor

forțe externe, și aici vom presupune că suspendarea are loc în puncte situate la aceeași înălțime [1], [2].

2. Forțele care acționează asupra conductorului

Se poate determina forța totală ce acționează asupra conductorului prin relația [3], [4], [5], [6], [7], [8]:

$$\vec{p} = \vec{Q} + \vec{G} + \vec{V}_C \quad (1)$$

\vec{Q} : greutatea conductorului; \vec{G} : forța rezultată din greutatea gheții ce acționează asupra unei unități de lungime; \vec{V} forța rezultată din acțiunea vântului asupra conductorului

Sarcina specifică asupra secțiunii conductorului:

$$P_1 = \frac{m \cdot 9,806}{a_o \cdot 10^3} \quad (2)$$

m: masa conductorului. Calculul secțiunii conductorului a_o :

$$a_o = \frac{3,14 \times d^2}{4} \quad (3)$$

Săgeata, așa cum se arată în figura 1, este definită ca fiind distanța verticală dintre punctul unde linia este unită cu stâlpul și cel mai de jos punct al liniei. Săgeata nu trebuie să fie prea mică, în caz contrar distanțele de siguranță nu pot fi îndeplinite.

Săgețile se calculează cu relația următoare: $f = \frac{p_1 \cdot l_1^2}{8 \cdot g_o}$ (4)

unde, g_o : tensiunea în conductor; l_1 : deschiderea lungimii

$$\text{Înălțimea centrului de greutate: } h_n = h_c - \frac{2}{3} f \quad (5)$$

unde, h_c : Înălțimea medie a punctelor de prindere pe stâlpi

Calcularea grosimii gheții:

(6)

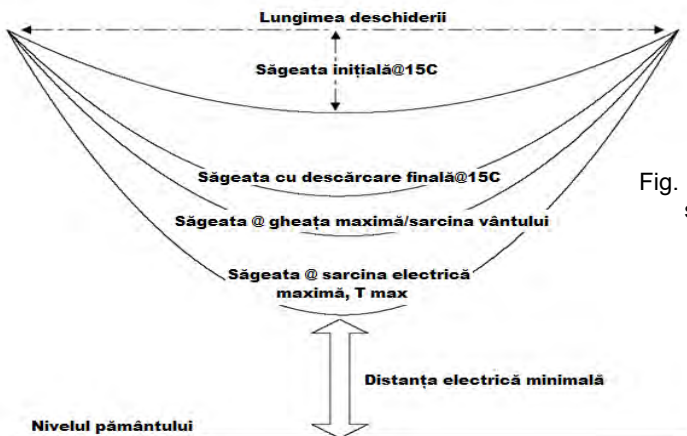


Fig. 1 Curbura săgeții

$$b = ch \cdot K_{c1} \cdot K_{c2}$$

unde, ch : Grosimea stratului de gheață; K_{c1} : coeficient de corectare a stratului de gheață în funcție de înălțime; K_{c2} : coeficient de corectare a stratului de gheață în funcție de diametrul conductorului.

Tabelul 1 cuprinde coeficienții de corecție în funcție de înălțime.

Tabelul 1

K_{c1} : coeficientul de corecție	h_{np} : înălțime
$K_{c1} = 1$	$h_{np} \leq 10$
$K_{c1} = 1 + 0.02(h_{np} - 10)$	$10 \leq h_{np} < 30$
$K_{c1} = 1.4 + 0.01(h_{np} - 30)$	$30 \leq h_{np} < 70$
$K_{c1} = 1.8 + 0.00667(h_{np} - 70)$	$70 \leq h_{np} < 100$
$K_{c1} = 2 + 0.005(h_{np} - 100)$	$100 \leq h_{np} < 200$
$K_{c1} = 2.5 + 0.00333(h_{np} - 200)$	$200 \leq h_{np} < 350$
$K_{c1} = 3$	$h_{np} \geq 350$

Tabelul 2 cuprinde coeficienții de corecție în funcție de diametru.

Tabelul 2

K_{c2} : coeficientul de corecție	d (mm) : diametru conductorului
$K_{c2}=1$	$d \leq 10$
$K_{c2}=1+0.01(10-d)$	$10 < d < 30$
$K_{c2}=0.8+0.005(30-d)$	$d \geq 30$

Sarcina specifică rezultată din acțiunea gheții

$$P_2 = (2.83 * b * (d + b) * 10e - 3) / a_o \quad (7)$$

Sarcina specifică a conductorului și a greutateii gheții

$$P_3 = P_1 + P_2 \quad (8)$$

Aria secțiunii conductorului acoperit de gheață pentru un metru de

$$\text{lungime: } F = (d + (2 * b)) * n * 10e2 \quad (9)$$

$$\text{Presiune a vântului la o înălțime de 15 mi: } q_o = \frac{V^2}{1.6} \left(N / m^2 \right) \quad (10)$$

$$\text{Presiune a vântului la o înălțime pentru studiu de caz } q = K_f * q_o \quad (11)$$

Tabelul 3 cuprinde coeficienții de corecție a variației presiunii vântului în funcție de înălțime.

Tabelul 3

K_f : coeficient de corecție	h_{np} : înălțimea
$K_f = 1$	$h_{np} < 15$
$K_f = 1 + 0.05(h_{np} - 15)$	$15 \leq h_{np} < 20$
$K_f = 1.25 + 0.015(h_{np} - 20)$	$20 \leq h_{np} < 40$
$K_f = 1.55 + 0.01(h_{np} - 40)$	$40 \leq h_{np} < 60$
$K_f = 1.75 + 0.00875(h_{np} - 60)$	$60 \leq h_{np} < 100$

$K_f = 2.1 + 0.005(h_{np} - 100)$	$100 \leq h_{np} < 200$
$K_f = 2.6 + 0.00333(h_{np} - 200)$	$200 \leq h_{np} < 350$
$K_f = 3.1$	$h_{np} \geq 350$

Factorul de rezistență frontală se determină conform formulei următoare: dacă $d < 20$ mm atunci $c_x = 1.2$; dacă $d > 20$ mm atunci $c_x = 1.1$

$$pa4 = \frac{c_x \cdot av \cdot K1 \cdot q \cdot d \cdot 10e-3}{a^\circ} \quad (12)$$

$$pa5 = \frac{c_x \cdot av \cdot K1 \cdot q \cdot (d + [2 \cdot b]) \cdot 10e-3}{a^\circ} \quad (13)$$

Tabelul 4 reprezintă valoarea av în funcție de presiunea vântului.

Tabelul 4

av	$q(N/m^2)$
$av=1$	$q < 270$
$av=1+0.001154(270-q)$	$270 \leq q < 400$
$av=0.85+0.000667(400-q)$	$400 \leq q < 550$
$av=0.75+0.000238(550-q)$	$550 \leq q < 760$
$av=1$	$q \geq 760$

Tabelul 5 reprezintă coeficientul determinat ($K1$) de deschiderea lungimii (l) în funcție de acțiunea vântului

Tabelul 5

$K1$	$l(m)$
$K1=1.2$	$l < 50$
$K1 = 1.2 + 0.002(50-l)$	$50 \leq l < 100$
$K1=1.1+0.001(100-l)$	$100 \leq l < 150$
$K1=1.05+0.0005(150-l)$	$150 \leq l < 250$
$K1=1$	$l \geq 250$

$$aa = \sqrt{1 - \cos \beta^2 * \cos \theta^2} \quad (14)$$

Se calculează sarcina pe trei axe X, Y, Z:

$$P_{x4} = P_{a4} * \sin^2 \theta * \cos^2 \theta * aa \quad (15)$$

$$P_{y4} = P_{a4} * \sin \varphi * aa \quad (16)$$

$$P_{z4} = [- P_{a4} * \sin \theta * \cos \theta * \cos \varphi] * a \quad (17)$$

$$P_5 = \sqrt{(P_{x4})^2 + (P_{y4})^2 + (P_{z4})^2} \quad (18)$$

$$P_t = \sqrt{(P_3)^2 + (P_5)^2} \quad (19)$$

3. Ecuația fundamentală a stării conductorului

Pentru a determina stresul mecanic și săgețile la schimbările climatice (chiciură – vânt, sarcină etc.), trebuie să găsim o relație matematică care să includă toate aceste valori, și această formulă se va numi ecuația de bază a stării conductorilor.

Presupunem că acest conductor se află într-o primă fază, la o temperatură, sarcină și tensiune specifică și o anumită lungime și se impune să se găsească o nouă tensiune și sarcină termică (în ultimul caz) [3], [9].

Să presupunem că parametrii cablului în prima faza sunt: t Temperatura, L lungimea conductorului, γ Sarcină specifică, δ Stresul în punctul zero al conductorului.

Starea conductorului este dată de următoarele ecuații:

$$\delta^3 + A * \delta^2 - \beta = 0 \Rightarrow \delta^2 * (\delta + A) = \beta \quad (20)$$

Această ecuație este o ecuație de gradul al treilea și poate fi rezolvată prin alegerea valorilor pozitive pentru tensiune prin încercări manuale. În cazul erorilor, se alege o valoare diferită pentru tensiune și se repetă calculul de mai multe ori, până când se ajunge la o soluție. În multe cazuri se poate ajunge la o soluție prin două sau trei încercări. Pentru simplificare, să presupunem [3], [9]:

$$\delta_0 = g_0, \gamma_0 = p_1, \beta = B, \delta = X \quad (21)$$

Calculul factorului A:

$$A = \frac{P^2 \cdot E \cdot l^2}{24 g_o^2} - g_o + (\alpha \cdot E)(t - t_o) \quad (22)$$

Calculul factorului B:

$$B = \frac{(pt)^2 \cdot E \cdot l^2}{24} \quad (23)$$

Dacă $x = \delta$:

$$X_2 = \sqrt{\frac{B}{X_1 + |A|}} \quad (24)$$

Dacă : $|X_2 - X_1| \leq 0.0001$ (25)

Atunci: $\delta = X_2$ (26)

Există mai multe modalități de a rezolva ecuația de stare printr-o aproximare corectă într-o anumită măsură, dar vom rezolva această ecuație folosind metoda de iterații a algoritmului pentru a găsi software-ul adecvat și corect.

4. Metoda iterativă

Pentru a rezolva ecuația $F(X) = 0$ prin utilizarea metodei de încercare și eroare, algoritmul soluție poate fi rezumată după cum urmează [9]:

- 1- vom rearanja ecuația să devină $X_2 = g(X_1)$
- 2- Citirea valorii inițiale pentru x_1 și a valorii de precizie ale lui ϵ
- 3- Alegem $l = 1$
- 4- Se calculează valoarea lui X_2 conform ecuației $X_2 = g(X_1)$ și apoi se printează valorile X_1 și X_2
- 5- În cazul în care diferența absolută dintre X_1, X_2 este conform ecuației: $|X_2 - X_1| \leq \epsilon$
Se trece la pasul 7 sau se trece direct la pasul 6.
- 6- Schimbând valorile X_1 cu X_2 atunci adăugăm 1 la valorile măsurate și se întoarce la pasul 4.
- 7- se printează ecuația rădăcină care reprezintă X_2 .
- 8- Stop.

Următorul exemplu vă arată cum putem utiliza acest algoritm.

Să găsim rădăcina următoarei ecuații: $F(X) = 5.25X - \sec\sqrt{0.68x} = 0$

Rezolvare: Putem reorganiza ecuația pentru a deveni următoarea formula necesară: $x_2 = g(x_1) = (\sec\sqrt{0.68x_1})/5.25 = 0$

În tabelul 6 găsim denumirile utilizate în program pentru această problemă.

Tabelul 6

variabilă	Variabilă în program	Valoarea numerică
(valoarea inițială) 0.1	X1	X_1
0.0001	Eps	ϵ
Calculul în program	X2	X_2
Funcție internă	$g(x)$	$g(x)$
contor pentru numărul de iterație	i	i

5. Program de rezolvare a ecuațiilor

```
#include<iostream.h>
#include<math.h>
void fact1(float&hnp,float&kc1,float&kf);
void fact2(float&d,float&kc2);
void fact_av(float&q,float&av);
void fact3(float&l1,float&k1);
void main() //funcție principală
{
float kc1,kc2,kf,av,k1,q,b,q0,cx,f,F;
float h,d,l1,n,m,v,ch,t,t0,beta,fay,E,a;
float hnp,a0,g0,tetta,x1=0.1,x2;
float p1,p2,p3,p4,p5,pt,y,y1;
cout<<" Enter the height.h: "<<endl; //date de intrare
cin>>h;
cout<<" Enter diameter of conductor[mm]. d: "<<endl;
cin>>d;
cout<<" Enter the long of gap[m]. l1: "<<endl;
cin>>l1;
```



```

cout<<" Enter number wires of conductor.n: "<<endl;
cin>>n;
cout<<" Enter specific wight of conductor[kg.m]. m: "<<endl;
cin>>m;
cout<<" Enter velocity of wind[m/sec]. v: "<<endl;
cin>>v;
cout<<" Enter criterion thick of ice[mm]. ch : "<<endl;
cin>>ch;
cout<<" Enter intitial temperature[c°]. t0: "<<endl;
cin>>t0;
cout<<" Enter study temperature[c°]. t: "<<endl;
cin>>t;
cout<<" Enter flexibility factor[kg/mm2]. E: "<<endl;
cin>>E;
cout<<" Enter the heat dilation factor[1/c°]. a: "<<endl;
cin>>a;
st:cout<<" Enter angle of wind direction on gap.beta: "<<endl;
cin>>beta;
cout<<" Enter angle of on x axis.fay: "<<endl;
cin>>fay;
if(fay>beta)
{ cout<<"must be beta bigger than fay\n";
goto st;}
cout<<" Enter zero stress. g0[kg/mm2]: "<<endl;
cin>>g0;
a0=3.14*d*d/4; //calculul secțiunii conductorului
p1=(m*9.806)/(1000*a0); // Sarcina specifică asupra secțiunii conductorului
f=(p1*11)/(8*g0); //calculul deschiderii
hnp=h-(2/3)*f; //sub-funcție de calcul kc1,kf
fact1(h,kc1,kf);
fact2(d,kc2); // calculul grosimii gheții
b=ch*kc1*kc2;

p2=(2.83*b*(d+b)*10e-3)/a0; //Sarcina specifică rezultată din acțiunea gheții

p3=p1+p2; // Sarcina specifică a conductorului și a greutateii gheții
F=(d+(2*b))*n*10e2 // Aria secțiunii conductorului acoperit de gheață pentru 1m
q0=(v*v/1.6); // Presiune a vântului la o înălțime de 15 metri
q=kf*q0; //Presiune a vântului la o înălțime pentru studiu de caz
if(b<20)cx=1.2; // Factor de rezistență frontală
else cx=1.1;
fact_av(q,av); // funcția de apelare pentru calculul factorului av
fact3(l1,k1); // funcția de apelare pentru calculul factorului av k1
float pa4=(cx*av*k1*q*d*10e-3)/a0;
float pa5=(cx*av*k1*q*(d+(2*b))*10e-3)/a0;//soluții cu gheață și vânt
beta=(3.14/180)*beta; //schimbarea unghiului în sistem radian
fay=(3.14/180)*fay;

```

```

tetta=acos(cos(beta)/cos(fay));
float aa=sqrt(1-pow(cos(beta),2)*pow(cos(tetta),2)); // sarcina pe trei axe X, Y, Z
float px4=(pa4*pow(sin(tetta),2)*pow(cos(tetta),2))*aa;
float py4=pa4*sin(fay)*aa;
float pz4=(-1*pa4*sin(tetta)*cos(tetta)*cos(fay))*aa;
p5= sqrt(pow(px4,2)+pow(py4,2)+pow(pz4,2));
pt=sqrt(pow(p3,2)+pow(p5,2));
float A=((p1*p1*E*I1*I1)/(24*g0*g0))-g0+(a*E)*(t-t0); // factor A
float B=(pt*pt*E*I1*I1)/24; // factor B
cout<<"\n\n\n A="<<A<<"\n B= "<<B;
for(int i=0;i<100;i++)
{
    float x2=sqrt(B/(x1+fabs(A))); // state equation
    if(fabs(x2-x1)<=0.0001)
    {
        cout<<"\n\n\la Segma= [ "<<x2<<" );
        ch=1; break;}
    x1=x2; }
if(ch==0) cout<<"\n there are'nt good solution"; }

void fact1(float&hnp ,float& kc1,float&kf) //subfuncția pentru calculul kc1,kf
{
    if (hnp>=10&&hnp<=30) kc1= 1+0.02*(hnp-10);
    else if(hnp>30&&hnp<=70) kc1= 1.4+0.01*(hnp-30);
    else if(hnp>70&&hnp<=100) kc1= 1.8+0.00667*(hnp-70);
    else if(hnp>100&&hnp<=200){ kc1= 2+0.005*(hnp-100);

kf=2.1+0.005*(hnp-100); }
    else if(hnp>200&&hnp<=350){ kc1= 2.5+0.00333*(hnp-200);

kf=2.6+0.00333*(hnp-200); }
    else { kc1= 3;kf=3.1; }
    if (hnp<15) kf=1;
    else if(hnp>15&&hnp<=20) kf= 1+0.05*(hnp-15);
    else if(hnp>20&&hnp<=40) kf= 1.25+0.015*(hnp-20);
    else if(hnp>40&&hnp<=60) kf= 1.55+0.01*(hnp-40);
    else if(hnp>60&&hnp<=100) kf= 1.75+0.00875*(hnp-60);
}
void fact2(float&d,float&kc2) // subfuncția pentru calculul kc2
{
    if (d<=10) kc2=1;
    else if(d>10&&d<30) kc2= 1+0.01*(10-d);
    else kc2=0.8+0.005*(30-d);
}
void fact_av(float&q,float&av) // subfuncția pentru calculul av
{

```

```

if (q<270) av=1;
else if(q>=270&q<=400) av=1+0.001154*(270-q);
else if(q>400&q<=550) av=0.85+0.000667*(400-q);
else if(q>550&q<=760) av=0.75+0.000238*(550-q);
else av=1;
}
void fact3(float&l1,float&k1)           // subfuncția pentru calculul k1
{
    if(l1<=50) k1=1.2;
    else if(l1>50&l1<=100) k1=1.2+0.002*(50-l1);
    else if(l1>100&l1<=150) k1=1.1+0.001*(100-l1);
    else if(l1>150&l1<=250) k1=1.05+0.0005*(150-l1);
    else k1= 1;
}

```

6. Concluzii

- Forțele totale vor alungi ireversibil conductorul pe durata întregii utilizări, așadar vom lua în calcul o marjă de siguranță atunci când proiectăm.
- Proiectarea optimă a liniilor electrice este foarte importantă, pentru că cele mai multe dintre ele vor funcționa mai bine de 40 de ani în toată lumea, și algoritmi utilizați în acest articol susțin această propunere.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Hatibovic, A., *Derivation and Analysis of the Relation between Conductor Sags in Inclined and Levelled Spans Based on Known Data of the Latter*, CIGRE 2014.
- [2] Muhr, M., Pack, S., Schwarz, R., Jauffer, S., *Calculation of Overhead Line Sags*, 51st Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, 2006.
- [3] Neagu, B., *Program de calcul pentru soluționarea numerică a ecuației de stare a conductoarelor liniilor electrice aeriene. Trasarea curbelor de montare a conductoarelor*, Laborator transportul și distribuția energiei electrice, 2011.
- [4] Hatibovic, A., *Derivation of Equations for Conductor and Sag Curves of an Overhead Line Based on a Given Catenary Constant*, Hungary, 2014.
- [5] Partanen, J., Pajala, H., and Kumpulainen, L., *A personal computer based design system for profiling overhead lines*, Finland, 2000.
- [6] * * * Chisholm Institute of TAFE, *Design overhead distribution systems*, Australia, 2010.

- [7] Lindberg, Elisabeth, *The Overhead Line Sag Dependence on Weather Parameters and Line Current*, Sweden, 2011.
- [8] Slegers, J., *Sag Calculations and High-Temperature Conductor Technologies*, Iowa State University, 2011.
- [9] Czumbil, L., *Metode numerice de rezolvarea ecuațiilor eliniare algebrice și transcendente*, România, 2015.

Drd.Ing. Feras MAHFOUD
Universitatea Politehnica București
e-mail: ferasymh@yahoo.com

Drd.Ing. Damian TIMOFTE
Universitatea Politehnica București
e-mail: damiantimofte@yahoo.com

Dr.Ing. Moutasem ALKHATIB
Universitatea Politehnica București
e-mail: moutasemalkhatib@yahoo.com