

## Verificarea stabilității termice și dinamice a căilor de curent

Curenții de scurtcircuit produc efecte termice și eforturi mecanice (încovoiere, întindere, compresie). De aceea este necesară verificarea stabilității termice la diverse momente din momentul apariției scurtcircuitului și verificarea stabilității dinamice la curentul de șoc.

### a) Verificarea stabilității termice. Metoda rigidității termice

Verificarea stabilității termice are ca scop verificarea secțiunii alese ( $s$ ) în condiții de scurtcircuit, cu relația:

$$s \geq s_t \quad (1)$$

unde:  $s_t$  - secțiunea minimă stabilită termic.

Se poate verifica și valoarea maximă a temperaturii pe care o atinge conductorul,  $\theta_k$ , la trecerea curentului de scurtcircuit, o anumită perioadă de timp, cu relația:

$$\theta_k \leq \theta_{k \max} \quad (2)$$

în care  $\theta_{k \max}$  este temperatura maximă a conductorului la deconectarea scurtcircuitului și care este pentru conductoare neizolate:

- din aluminiu, 180 °C;
- din cupru și oțel, 200 °C.

Pentru cabluri:

$U_n$ [kV]	6	6-20	> 20
$\theta_{k \max}$ [°C]	160	140	120

Regimul termic de scurtcircuit este un regim de scurtă durată, procesul termic putând fi considerat adiabatic. Variația în timp a temperaturii conductorului este prezentată în figura 1.

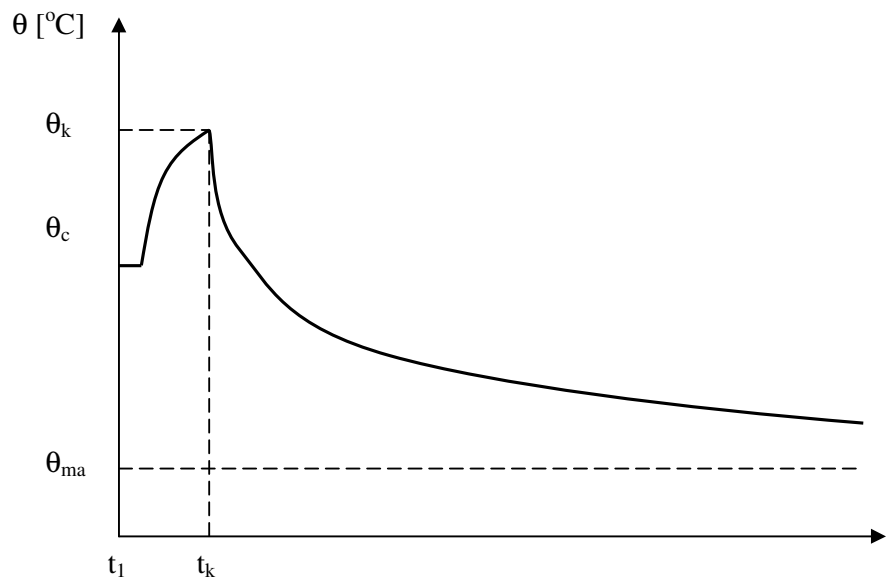


Fig. 1. Variația temperaturii în conductor la scurtcircuit

Ecuția de bilanț energetic pentru intervalul  $dt$  în care conductorul parcurs de  $I_k$  se încălzește cu  $d\theta$  în regim adiabatic este:

$$R_{\theta} \cdot i_k^2 \cdot dt = c_0 \cdot m \cdot d\theta \quad (3)$$

sau

$$\frac{\rho_0 \cdot (1 + \alpha_R \cdot \theta)}{s} \cdot s^2 \cdot j_K^2 \cdot dt = c_0 \cdot (1 + \beta \cdot \theta) \cdot \gamma \cdot s \cdot l \cdot d\theta \quad (4)$$

unde:  $\rho_0$  - rezistivitatea;  $c_0$  - căldura specifică;  $\alpha_R$  și  $\beta$  - coeficienții termici;  $s$  - secțiunea;  $l$  - lungimea;  $\gamma$  - densitatea materialului;  $j_k$  - densitatea de curent la scurtcircuit;  $\theta = \theta_k - \theta_c$  - supraîncălzirea la scurtcircuit;  $\theta_c$  - temperatura inițială a conductorului, care se determină cu relația:

$$\theta_c = \theta_{ma} + (70 - \theta_{ma}) \cdot \frac{I_c^2}{I_{ad}^2} \quad (5)$$

unde:  $\theta_{ma}$  - temperatura aerului;  $70^\circ\text{C}$  - temperatura maximă admisă în conductorul neizolat în regim normal de lungă durată;  $I_c$  - curentul real în conductorul neizolat în regim normal de lungă durată;  $I_{ad}$  - curentul maxim admis de durată corespunzătoare secțiunii și temperaturii  $\theta_{ma}$ , în A.

Caracteristicile fizico-mecanice ale principalelor materiale conductoare folosite pentru realizarea barelor (căilor de curent rigide) sunt prezentate în tabelul 1:

Tabelul 1: Proprietățile fizico-mecanice ale unor materiale conductoare

Marimi caracteristice	Simb.	Unitate de măsură	Cupru CuE	Aluminiu AIE 99,5%	Aliaj de Al (Fe) cu Mg și Si F22
Densitatea	$\gamma$	kg/dm <sup>3</sup>	8,9	2,7	2,7
Conductivitatea electrică la 20 °C		m/Ωmm <sup>2</sup>		3	30
Rezistivitatea electrică la 20 °C	$\rho_{20}$	Ωmm <sup>2</sup> /m	0,0178	0,0286	0,0333
Coef. de var. a rezistivității cu temperatura (1 – 100 °C)	$\alpha_R$	1/K	0,0038	0,004	0,0036
Coef. de dilatare termică liniară (1 – 100 °C)	$\alpha_1$	mm/mK	0,17	0,25	930
Căldura specifică	$c$	Ws/kgK	390	950	0,23
Modulul de elasticitate	$E$	N/mm <sup>2</sup>	120000	65000	70000
Rezistența la rupere	$\alpha$ 1 2 3	N/mm <sup>2</sup>	200/850 200/250 200/200	70/80 70/90 -	90/220 140/160 -
Limita de curgere inferioară	$\alpha_{02}$ 1 2 3	N/mm <sup>2</sup>	150/260 110/230 100/210	40/100 60/100 -	60/155 160/240 -

Valorile sunt orientative și trebuie confirmate prin încercări sau de fabricant.

Densitatea de curent  $j_k$  admisă în regim de scurtcircuit se determină în funcție de materialul conductorului (Cu, Al), de temperatura sa inițială  $\theta_c$  și de temperatura maximă admisă  $\theta_k$  la sfârșitul scurtcircuitului, din monogramele prezentate în figura 2.

Pentru verificarea stabilității termice a căilor de curent în regim de scurtcircuit se pot utiliza mai multe metode, dintre care cea mai practică este următoarea:

➤ **Metoda rigidității termice**

Prin integrarea ecuației (4) pentru  $t \in (0, t_k)$  și  $\theta \in (\theta_c, \theta_k)$  se obține:

$$\int_0^{t_k} \frac{I_k^2(t)}{S^2} \cdot dt = \frac{c_0 \cdot \gamma}{\rho_0} \cdot \int_{\theta_c}^{\theta_k} \frac{1 + \beta \cdot \theta}{1 + \alpha \cdot \theta} \cdot d\theta \quad (6)$$

Prin integrare se obține relația:

$$\frac{I_k^2}{S^2} \cdot t_k = A_k(\theta) - A_c(\theta) \quad (7)$$

unde:

$$A(\theta) = \frac{C_0 \cdot \gamma}{\rho_0} \left[ \frac{\alpha - \beta}{\alpha^2} \cdot \ln(1 + \alpha\theta) + \frac{\beta}{\alpha} \cdot \theta \right] \quad (8)$$

reprezintă rigiditatea termică a conductorului.

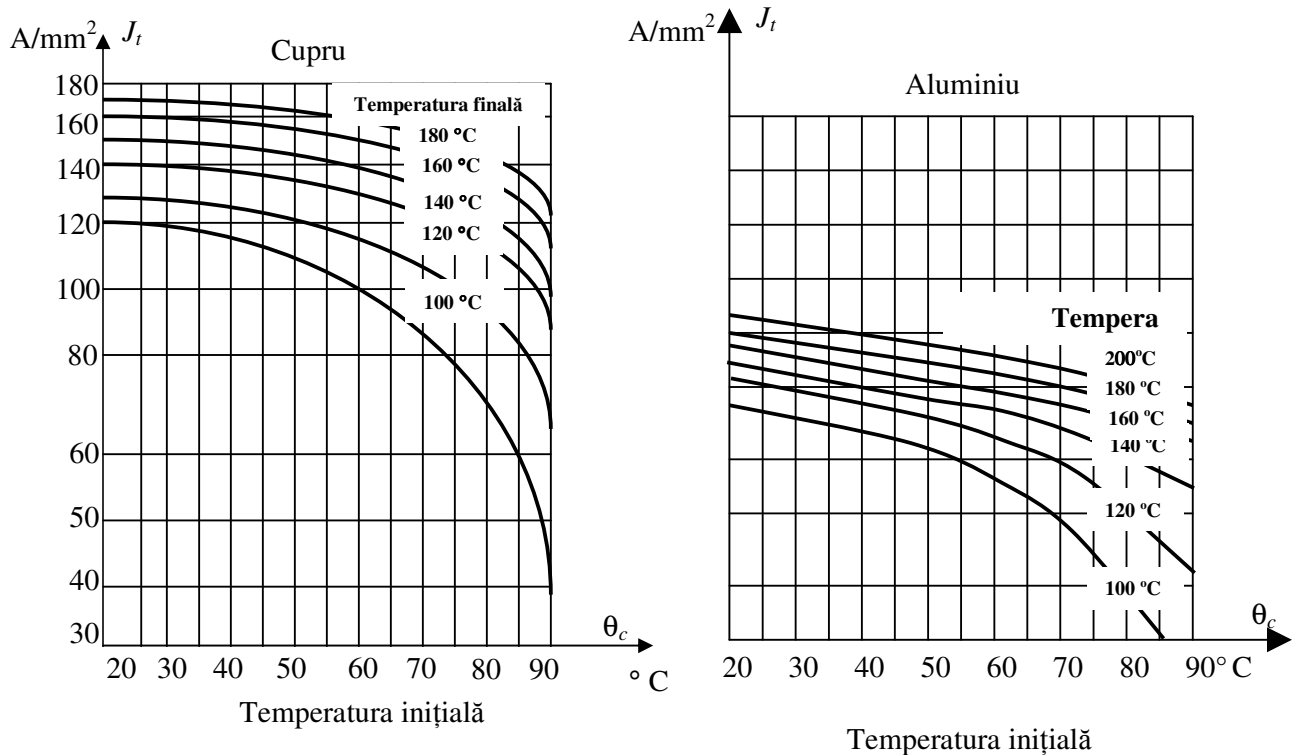


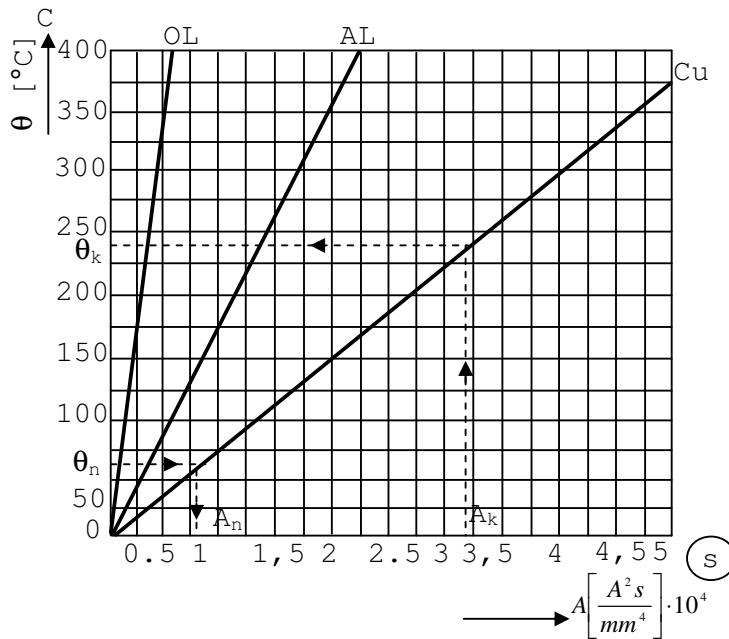
Fig. 2. Valoarea densității de curent în regim de scurtcircuit: a) cupru; b) aluminiu

Pentru principalele materiale conductoare (cupru, aluminiu, oțel) s-au făcut calculele și s-a întocmit monograma  $A(\theta)$  reprezentată în figura 4.

Cunoscând temperatura inițială a conductorului,  $\theta_c$ , din diagramă se determină  $A_c(\theta)$ . Din relația (7) rezultă valoarea  $A_k(\theta)$ , iar în diagramă valoarea  $\theta_k$  la sfârșitul perioadei de scurtcircuit, care nu trebuie să depășească valoarea maximă admisă.

Similar se poate verifica secțiunea aleasă în regim de scurtcircuit. Valoarea maximă admisă a secțiunii pentru  $I_k$  impus se determină cu relația:

$$s_t = I_k \cdot \sqrt{\frac{t_k}{A_k \cdot \theta(-A_c(\theta))}} \geq s_t \quad (9)$$

Fig. 3 Variația temperaturii funcție de  $A(\theta)$ 

### b) Verificarea stabilității dinamice. Verificarea la solicitări statice

Conductoarele parcurse de curenți sunt supuse unor forțe electrodinamice de atracție sau de respingere. În caz de scurtcircuit aceste forțe pot deveni atât de mari încât efortul la încovoiere al conductoarelor și solicitările la încovoiere, compresie și tracțiune la care sunt supuse izolatoarele necesită verificarea acestora prin calcul.

Solicitările mecanice la care sunt supuse conductoarele pot fi:

- ✓ Forțe electrodinamice care apar la scurtcircuit;
- ✓ Forțele datorate greutateii proprii, chiciurii și a vântului;
- ✓ Forțele seismice.

Determinarea eforturilor la care sunt supuse se va face în următoarele condiții:

- conductoarele sunt dispuse paralel, iar lungimea lor este mult mai mare decât distanța dintre ele;
- circuitele trifazate sunt dispuse în același plan la distanțe egale ntre faze și nu sunt prevăzute cu ecran metalic;
- direcția forțelor electrodinamice coincide cu una din axele secțiunii.

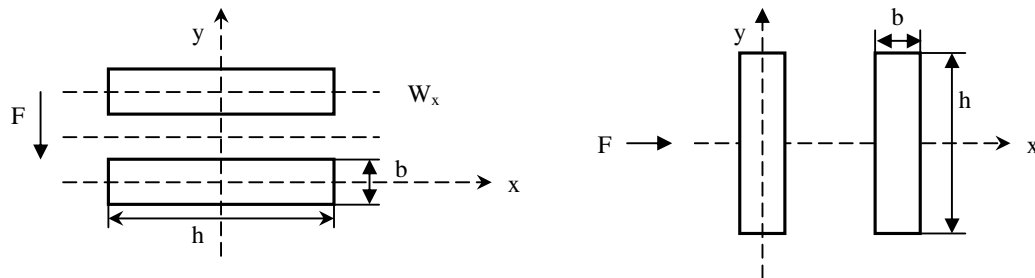


Fig. 1. Direcția forțelor electrodinamice față de axele principale ale secțiunilor

**Verificarea la solicitări statice**

Eforturile datorate forței electrodinamice totale care solicită conductorul pe lungimea unei deschideri în regim de scurtcircuit sunt date de forțele care apar între fază și între căile de curent al aceleiași faze (dacă sunt cel puțin 2 bare în paralel pe aceeași fază).

Forța electrodinamică dintre faze se determină cu relația:

$$F = 2,04 \cdot k_f \cdot (i_{kSOC})^2 \cdot \frac{l}{a} \cdot 10^{-2} \text{ [daN]} \quad (1)$$

unde:  $l$ - lungimea (distanța) dintre 2 puncte de sprijin pe izolatoarele suport, [m];  $a$ - distanța între axele a două faze vecine, [m];  $k_f$ - coeficient de formă, valoarea lui se determină din monograme.

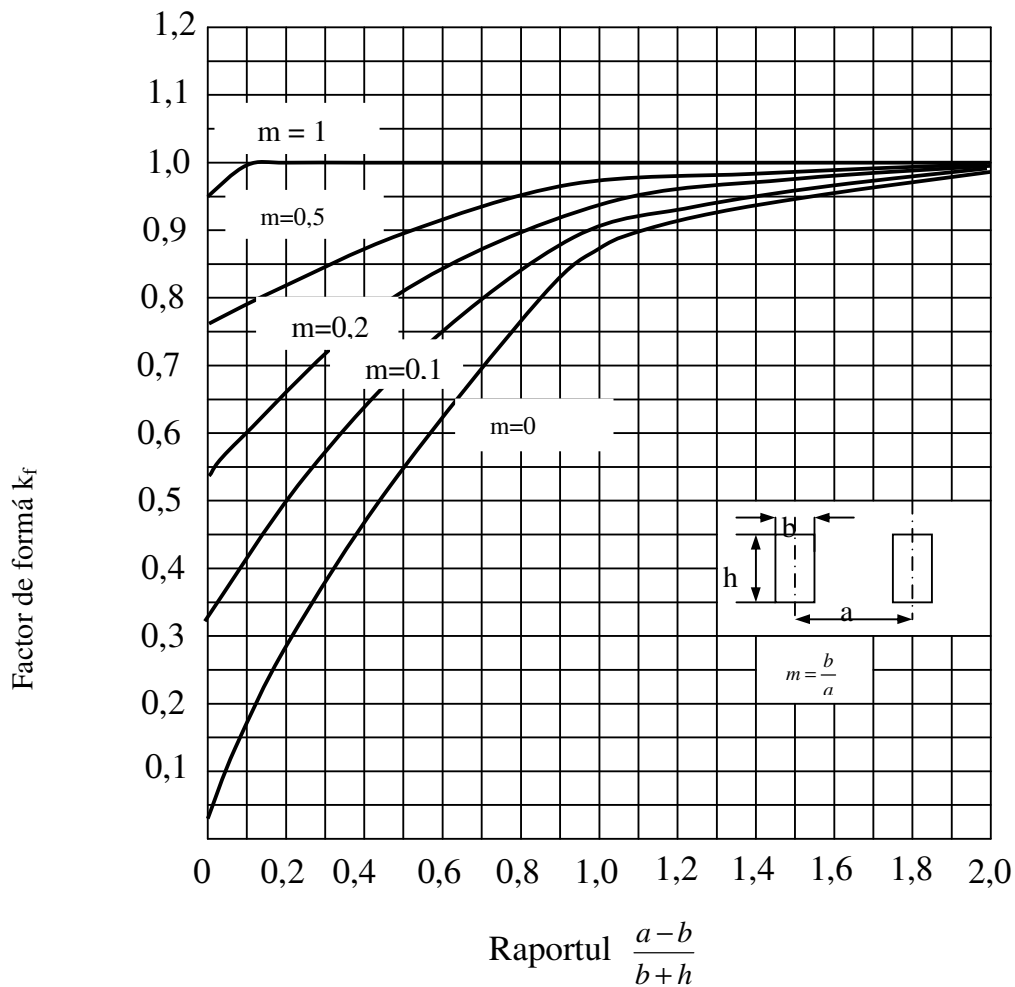
$$k_f = f(m, (a-b)/(h+b)), \quad m = h/b$$

Cunoscând forțele electrodinamice în regim de scurtcircuit se calculează eforturile la încovoiere care apar în bare cu relația:

$$\sigma = \frac{F \cdot l}{k \cdot W_y} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (2)$$

unde:  $k$ - coeficient care depinde de numărul de deschideri și de modul de fixare al barelor (simplu rezemate, încastrate);

$W$ - modulul de rezistență al conductorului în raport cu axa principală perpendiculară pe direcția forțelor, [cm<sup>3</sup>]. Valoarea lui se calculează în funcție de profilul barei, numărul de bare în paralel și modul de așezare al barelor (pe cant sau pe lat).



## Aplicație

Să se verifice la stabilitate termică și dinamică barele de 6 kV și 0,4 kV

### Barele de 6 kV

Considerăm bare de aluminiu 40x5 mm<sup>2</sup>. Sistemul de bare se sprijină pe izolatoare suport montate la l=1100 mm, iar distanța între axele fazelor este a=285 mm.

Se cunosc:  $I_c = 214 A$ ;  $I_{ad} = 494 A$ ;  $I_k = 19,260 kA$   $\theta = 25 ^\circ C$

**Verificarea stabilității termice.** Se va utiliza metoda rigidității termice. Se determină temperatura conductorului cu relația:

$$\theta_c = \theta + (70 - \theta) \cdot \left( \frac{I_c}{I_{ad}} \right)^2 = 25 + (70 - 25) \left( \frac{214}{494} \right)^2 = 33,3^\circ C$$

$\theta$  - temperatura mediului ambiant

$\theta_k$  - Valoarea maximă a temperaturii pe care o atinge conductorul la trecerea curentului de scurtcircuit (180 °C pentru aluminiu)

Din figura 3 pentru  $\theta_c = 33,3 ^\circ C$  rezultă  $A_c(\theta) = 0,3 \cdot 10^4 [A^2 s/mm^4]$ , iar pentru  $\theta_k = 180 ^\circ C$ ,  $A_k(\theta) = 1,25 \cdot 10^4 [A^2 s/mm^4]$ .

Secțiunea minimă stabilă termic în regim de scurtcircuit se va determina cu relația:

$$s = I_k \sqrt{\frac{t_k}{A_k(\theta) - A_c(\theta)}} = 19260 \sqrt{\frac{1}{(1,25 - 0,3) \cdot 10^4}} = 197 \text{ mm}^2 < 200 \text{ mm}^2$$

**Verificarea stabilității dinamice.** Forța electrodinamică între faze se calculează cu relația:

$$F = 2,04 \cdot k_f \cdot (i_{ksc})^2 \cdot \frac{l}{a} \cdot 10^{-2} = 2,04 \cdot 1 \cdot (47,0)^2 \cdot \frac{1100}{285} \cdot 10^{-2} = 174 \text{ daN}$$

unde:  $k_f$  - factor de formă.

Efortul unitar care apare în bare se calculează cu relația:

$$\sigma = \frac{Fl}{kW} = \frac{174 \cdot 1100}{8 \cdot 1333} = 17,95 \text{ daN/mm}^2$$

unde: k- coeficient care depinde de numrul de deschideri și de modul de fixare al barelor (simplu rezemate, incastrate)

Modelul de rezistență W s-a calculat cu relația:

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{5 \cdot 40^2}{6} = 1333 \text{ mm}^3$$

Din tabelul 1 rezultă pentru aluminiu  $\sigma_r = 700 \text{ daN/mm}^2$ , iar pentru rezistența la curgere  $\sigma_{0,2} = 400 \text{ daN/mm}^2$ . Să se calculeze valoarea admisă

$$\sigma_{ad} = \frac{\sigma_{rup}}{2,5} = \frac{700}{2,5} = 280 \text{ daN/mm}^2$$

Deoarece  $\sigma = 17,95 \ll 280 \text{ daN/mm}^2$ , secțiunea aleasă corespunde, atât la rupere cât și la curgere.

**Barele tabloului general 0,4 kV.** Din calcule au rezultat bare din aluminiu 100 x 10 mm<sup>2</sup>. Distanțele de montaj sunt l = 900 mm, a = 175 mm.

Se cunosc:  $I_c = 1432 \text{ A}$ ;  $I_{ad} = 1633 \text{ A}$ ;  $I_k = 27,260 \text{ kA}$   $\theta = 25 \text{ }^\circ\text{C}$

Verificarea stabilității termice

$$\theta_c = \theta + (70 - \theta) \cdot \left( \frac{I_c}{I_{ad}} \right)^2 = 25 + (70 - 25) \left( \frac{1432}{1633} \right)^2 = 59,6^\circ \text{ C}$$

Pentru  $\theta_c = 59,6^\circ \text{ C}$  și  $\theta_k = 180^\circ \text{ C}$ , rezultă  $A_c = 0,5 \cdot 10^4$  și  $A_k = 1,25 \cdot 10^4 \left[ \frac{\text{A}^2 \text{S}}{\text{mm}^4} \right]$ .

Secțiunea minimă stabilă termic:

$$s = 27260 \sqrt{\frac{1}{(1,25 - 0,5) \cdot 10^4}} = 314 \text{ mm}^2 < 1000 \text{ mm}^2 = 100 \times 10 \text{ mm}^2.$$

Verificarea stabilității dinamice

$$F = 2,04 \cdot 1 \cdot (63,81)^2 \cdot \frac{900}{175} \cdot 10^{-2} = 427 \text{ daN}$$

$$\sigma = \frac{427 \cdot 900}{8 \cdot 16667} = 28,82 \text{ daN/mm}^2$$

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{10 \cdot 100^2}{6} = 16667 \text{ mm}^3$$

Din tabelul 1 rezultă pentru aluminiu  $\sigma_r = 700 \text{ daN/mm}^2$ , iar pentru rezistența la curgere  $\sigma_{0,2} = 400 \text{ daN/mm}^2$ . Să se calculeze valoarea admisă

$$\sigma_{ad} = \frac{\sigma_{rup}}{2,5} = \frac{700}{2,5} = 280 \text{ daN/mm}^2$$

Deoarece  $\sigma = 28,82 \ll 280 \text{ daN/mm}^2$ , secțiunea aleasă corespunde, atât la rupere cât și la curgere.