

Elementi elektroenergetskih sistema

- Kritični raspon
- Kritična temperatura
- Montažne krive
- Mehanička sigurnost provodnika

2.1.5 Kritični raspon

- Kod temperatura prema kojima se vrši proračun dalekovoda, definisali smo:- minimalnu temperaturu $t_{\min} = -20^{\circ}\text{C}$
 - temperatura pri kojoj se hvata led $t_L = -5^{\circ}\text{C}$
 - maksimalna temperatura $t_{\max} = 40^{\circ}\text{C}$
- Kritičan raspon je raspon pri kome su naprezanja provodnika pri temperaturi od -20°C bez dodatnog opterećenja usled leda i pri temperaturi od -5°C sa dodatnim opterećenjem usled leda JEDNAKA.
- Kritični raspon ima smisla računati samo za umerene raspone, jer je kod velikih raspona dominantan uticaj dodatnog tereta usled leda i maksimalno naprezanje javlja se na $t = -5^{\circ}\text{C}$ sa dodatnim opterećenjem usled leda. Kod manjih raspona, uticaj dodatnog opterećenja usled leda je manji, te se maksimalno naprezanje može pojaviti pri minimalnoj temperaturi od -20°C .

2.1.5 Kritični raspon

Mogući su sledeći slučajevi: Raspon je kritičan ako su:

I

$\sigma_0 = \sigma_{nd}$	$t_0 = -5^\circ\text{C}$	$\gamma_0 = \gamma_r = \gamma + \gamma_{nd}$
$\sigma = \sigma_{nd}$	$t = -20^\circ\text{C}$	$\gamma = \gamma$

II

$\sigma_0 = \sigma_{nd}$	$t_0 = -20^\circ\text{C}$	$\gamma_0 = \gamma$
$\sigma = \sigma_{nd}$	$t = -5^\circ\text{C}$	$\gamma = \gamma_r = \gamma + \gamma_{nd}$

2.1.5 Kritični raspon

- γ_{nd} = normalna dodatna specifična težina usled leda:

$$\gamma_{nd} = k \cdot \gamma_{nd \min}, \quad \gamma_{nd} = k \cdot \frac{0.18 \cdot \sqrt{d}}{s} \left[\frac{daN}{m \cdot mm^2} \right]$$

γ = specifična težina provodnika

2.1.5 Kritični raspon

- Zamenom vrednosti iz I ili II u jednačinu promene stanja provodnika za umerene raspone:

$$\frac{a^2 \cdot \cos^2 \psi}{24} \cdot \left(\frac{\gamma^2}{\delta^2} - \frac{\gamma_0^2}{\delta_0^2} \right) = (t - t_0) \cdot \alpha + \frac{\delta - \delta_0}{E \cdot \cos \psi}$$

- Stavljajući $a=a_{kr}$, i kada se reši:

$$a_{kr} = \frac{\delta_{nd}}{\cos \psi} \cdot \sqrt{\frac{360 \cdot \alpha}{\gamma_r^2 + \gamma^2}}$$

2.1.5 Kritični raspon

- Nakon izračunavanja a_{kr} (kritični raspon) potrebno je stvarni raspon uporediti sa kritičnim.
- Stvarni raspon: $a > a_{kr}$ ili $a < a_{kr}$
- Ako je stvarni raspon veći od kritičnog, maksimalno naprezanje se javlja pri temperaturi $t = -5^{\circ}\text{C}$ sa dodatnom specifičnom težinom usled leda. Prema tome u ovakvim slučajevima je početna temperatura $t = -5^{\circ}\text{C}$, a početna specifična težina $\gamma_0 = \gamma_r = \gamma + \gamma_{nd}$.

2.1.5 Kritični raspon

■ (1) Ako je $a > a_{kr}$, maksimalno naprežanje: $\delta_{\max} = \delta_{nd}$, $t_0 = -5^\circ\text{C}$ sa dodatnom težinom usled leda, pa je $\gamma_0 = \gamma_r = \gamma + \gamma_{nd}$

■ Ako je $a > a_{kr}$, za početne vrednosti usvajaju se:

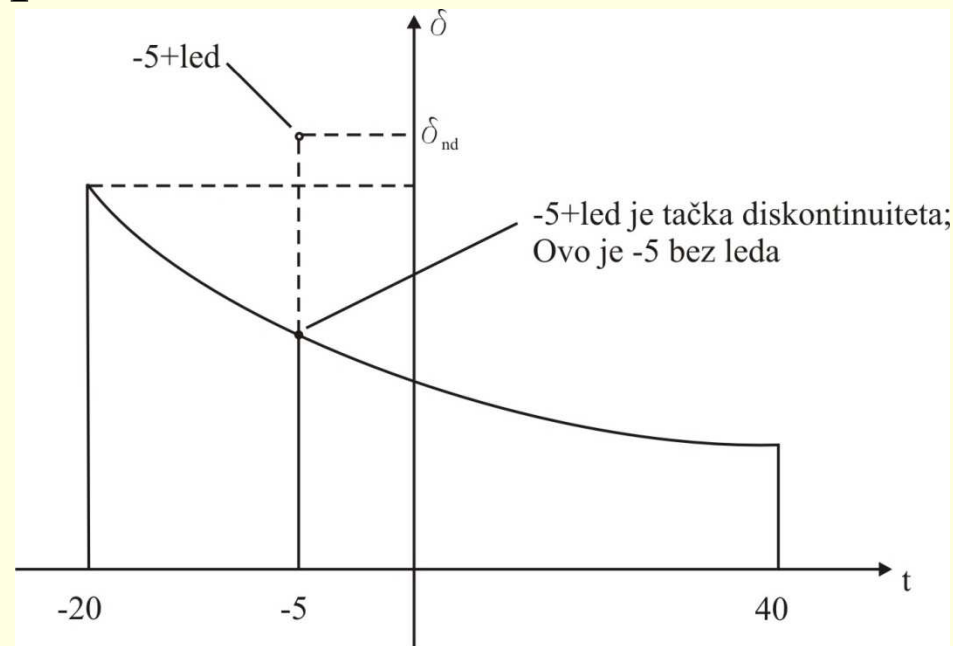
$$,,0'' \quad \delta_0 = \delta_{nd} \quad t_0 = -5^\circ\text{C} \quad \gamma_0 = \gamma_r = \gamma + \gamma_{nd}$$

■ Jednačina promene stanja provodnika je:

$$\frac{a^2 \cdot \cos^2 \psi}{24} \cdot \left[\frac{\gamma^2}{\delta^2} - \frac{\gamma_r^2}{\delta_{nd}^2} \right] = (t + 5) \cdot \alpha + \frac{\delta - \delta_{nd}}{E \cdot \cos \alpha}$$

2.1.5 Kritični raspon

- Gornja jednačina je $\delta = f(t)$, ali se uvek crta $t = \Phi(\delta)$, uglavnom je potrebno izračunati precizno naprezanje na zadatoj temperaturi.



$$a > a_{kr} \quad \delta_{nd} = \delta_{-5^{\circ}+led}$$

2.1.5 Kritični raspon

- Ako je stvarni raspon manji od kritičnog, maksimalno naprezanje se javlja pri temperaturi od -20°C , pri kojoj se ne javlja dodatno opterećenje usled leda. U ovakvim slučajevima $t_0 = -20^{\circ}\text{C}$, a $\gamma_0 = \gamma$
- (2) Ako je $a < a_{kr}$, tada je $\delta_{\max} = \delta_{nd}$, pri $t_0 = -20^{\circ}\text{C}$ i opterećenju $\gamma_0 = \gamma$

2.1.5 Kritični raspon

■ Ako je $a < a_{kr}$, usvajaju se za početne vrednosti:

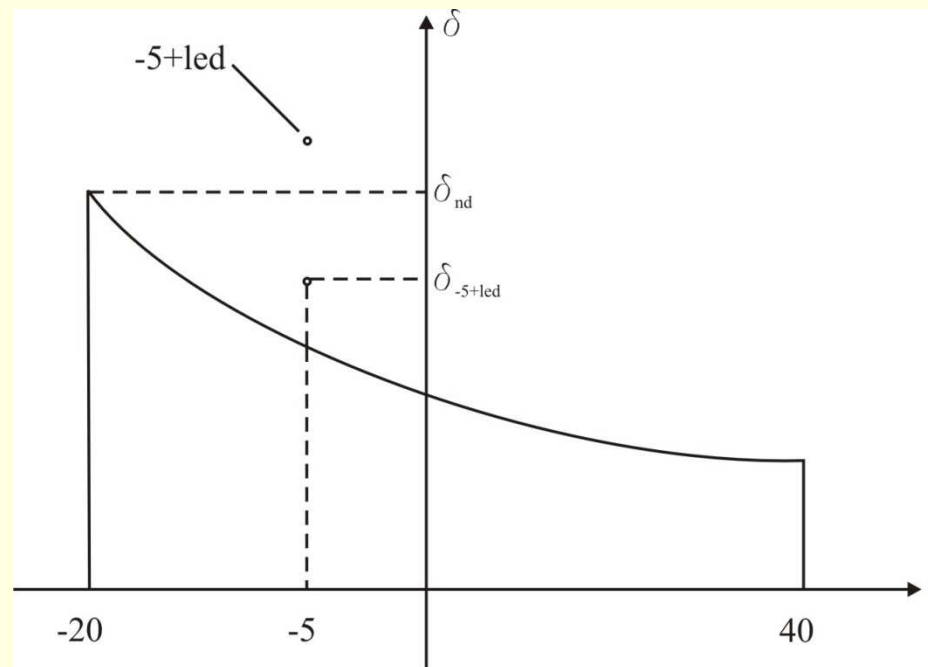
„0” $\delta_0 = \delta_{nd}$, $t_0 = -20^\circ\text{C}$, $\gamma_0 = \gamma$

■ Jednačina promene stanja provodnika je:

$$\frac{a^2 \cdot \gamma^2 \cdot \cos^2 \psi}{24} \cdot \left[\frac{1}{\delta^2} - \frac{1}{\delta_{nd}^2} \right] = (t + 20) \cdot \alpha + \frac{\delta - \delta_{nd}}{E \cdot \cos \psi}$$

2.1.5 Kritični raspon

- Opet se ima jednačina $\delta = f(t)$, a crta se $t = \Phi(\delta)$



$$a < a_{kr} \quad \delta_{nd} > \delta_{-5^\circ+led}$$

Tačka $-5^\circ C$ je opet tačka diskontinuiteta.

2.1.5 Kritični raspon

- Ukoliko se želi za određenu temperaturu izračunati naprezanje provodnika, jednačina stanja se piše u obliku kubne jednačine:

$$\delta^3 + A \cdot \delta^2 = B$$

2.1.5 Kritični raspon

- Znači prethodne relacije treba napisati u formi kubne jednačine po (δ), gde su A i B:

$a > a_{kr}$ $t_0 = -5^{\circ}C$	$E \cdot \cos \psi \cdot \left[\alpha \cdot (t + 5) + \frac{a^2 \cdot \gamma_r^2 \cdot \cos^2 \psi}{24 \cdot \delta_{nd}^2} \right] - \delta_{nd}$	$\frac{a^2 \cdot \gamma^2 \cdot E \cdot \cos^3 \psi}{24}$
$a < a_{kr}$ $t_0 = -20^{\circ}C$	$E \cdot \cos \psi \cdot \left[\alpha \cdot (t + 20) + \frac{a^2 \cdot \gamma^2 \cdot \cos^2 \psi}{24 \cdot \delta_{nd}^2} \right] - \delta_{nd}$	$\frac{a^2 \cdot \gamma^2 \cdot E \cdot \cos^3 \psi}{24}$

2.1.6 Kritična temperatura

- def: Najveći ugib provodnika može se pojaviti na maksimalnoj temperaturi $+40^{\circ}\text{C}$, ili na temperaturi $t_L = -5^{\circ}\text{C}$, uz prisustvo dodatne specifične težine usled leda.
- $P_{re} = \text{max. ugib}$ – s obzirom na to gde se javlja na vodu (ako je prav raspon na sredini, gde je tangenta paralelna sa spojnicom tačaka vešanja), a u buduće s obzirom na temperaturu.
- def: Na kritičnoj temperaturi ugib provodnika = je njegovom ugibu na temperaturi -5°C , uz prisustvo dodatne specifične težine usled leda

2.1.6 Kritična temperatura

def:



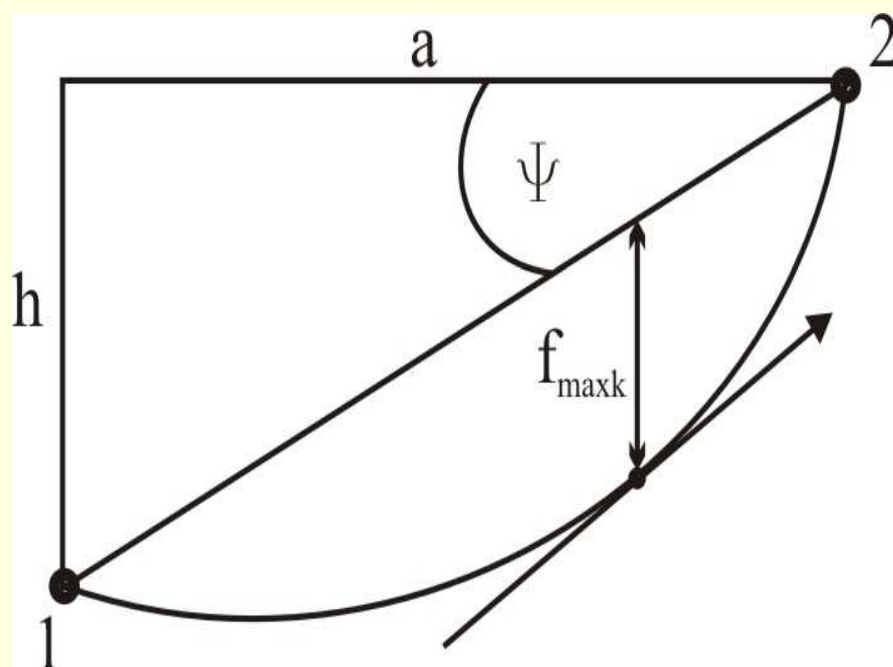
$$f_m(-5^{\circ}\text{C} + led) = f_L$$

$$f_m(t = t_{kr}) = f_{tkr}$$

$$f_{tkr} = f_{Led}$$

2.1.6 Kritična temperatura

■ Pre za maksimalni ugib:



$$f_{\max k} = \frac{a^2 \cdot \gamma}{8 \cdot \delta \cdot \cos \psi} + \frac{a^4 \cdot \gamma^3 \cdot \cos \psi}{384 \cdot \delta^3}$$

$$\frac{a^2 \cdot \gamma}{8 \cdot \delta_{tkr} \cdot \cos \psi} = \frac{a^2 \cdot \gamma_r}{8 \cdot \delta_L \cdot \cos \psi}$$

$$\delta_{tkr} = \delta_L \cdot \frac{\gamma}{\gamma_r}$$

2.1.6 Kritična temperatura

■ Dva stanja: $t = t_{kr}$, $\delta = \delta_{kr} = \delta_L \cdot \frac{\gamma}{\gamma_r}$, $\gamma = \gamma_r$

■ Smenom u jednačinu promene stanja za umerene raspone dobija se:

$$\frac{a^2 \cdot \cos \psi}{24} \cdot \left(\frac{\gamma^2}{\delta^2} - \frac{\gamma_0^2}{\delta_0^2} \right) = (t - t_0) \cdot \alpha + \frac{\delta - \delta_0}{E \cdot \cos \psi}$$

$$\frac{a^2 \cdot \cos^2 \psi}{24} \cdot \left[\frac{\gamma^2}{\left(\delta_L \cdot \frac{\gamma}{\gamma_r} \right)^2} - \frac{\gamma_0^2}{\delta_0^2} \right] = (t_{kr} - t_0) \cdot \alpha + \frac{\frac{\gamma}{\gamma_r} \cdot \delta_L - \delta_0}{E \cdot \cos \psi} - \text{plus treba izabrati početne uslove}$$

2.1.6 Kritična temperatura

- Da bi se odredila kritična temperatura (t_{kr}), potrebno je izabrati početne uslove za ovu relaciju. Najjednostavnija relacija se dobija ako se za stanje „0” izabere:

$$\text{„0”} \quad t_0 = -5^\circ\text{C}, \gamma_0 = \gamma_r, \delta_0 = \delta_L$$

- Zamenom „0” u prethodnoj jednačini dobija se:

$$\left[\frac{\gamma_r^2}{\delta_L^2} - \frac{\gamma_r^2}{\delta_L^2} \right] = 0 \Rightarrow t_{kr} = \frac{\delta_L}{\alpha \cdot E \cdot \cos \psi} \cdot \left(1 - \frac{\gamma}{\gamma_r} \right) - 5$$

2.1.6 Kritična temperatura

■ Postoje dva slučaja:

1. Za raspone $a > a_{kr}$, ova relacija je direktno primenljiva, jer je naprezanje:

$$\delta_L = \delta_{nd}$$

2. Za raspone $a < a_{kr}$, unapred se ne zna naprezanje δ_L , jer je ono u takvim slučajevima manje od maksimalno dozvoljenog.

2.1.6 Kritična temperatura

- U ovakvim slučajevima se prvo mora odrediti naprezanje iz jednačine stanja u koju treba uvrstiti sledeće veličine.

$t_0 = -20^{\circ}C$	$\gamma_0 = \gamma$	$\delta_0 = \delta_{nd}$
$t = -5^{\circ}C$	$\gamma = \gamma_r$	$\delta_L = ?$

2.1.6 Kritična temperatura

- Jednačina stanja provodnika za umerene raspone:

$$\frac{a^2 \cdot \cos^2 \psi}{24} \cdot \left(\frac{\gamma^2}{\delta^2} - \frac{\gamma_0^2}{\delta_0^2} \right) = (t - t_0) \cdot \alpha + \frac{\delta - \delta_0}{E \cdot \cos \psi}$$

- Uvrstiti gornje parametre i dobija se:

$$\delta_L^3 + A \cdot \delta_L^2 = B$$

$$A = 15 \cdot \alpha \cdot E \cdot \cos \psi + \frac{a^2 \cdot \gamma^2 \cdot E \cdot \cos^3 \psi}{24 \cdot \delta_{nd}^2} - \delta_{nd}$$

$$B = \frac{a^2 \cdot \gamma_r^2 \cdot E \cdot \cos^3 \psi}{24}$$

2.1.6 Kritična temperatura

- Sračunato δ_L , ide u t_{kr}
 - a.) Ako je kritična temperatura $t_{kr} > 40^\circ\text{C}$, maksimalni ugib javlja se pri temperaturi $t_{kr} = -5^\circ\text{C}$, uz prisustvo dodatne specifične težine leda.
 - b.) Ako je kritična temperatura $t_{kr} < 40^\circ\text{C}$, maksimalni ugib javlja se pri temperaturi $t_{kr} = +40^\circ\text{C}$

2.1.6 Kritična temperatura

$$f = \frac{a^2 \cdot \gamma}{8 \cdot \delta \cdot \cos \psi}, \text{ t (raste), } \sigma \text{ (opada), } f \text{ (raste).}$$

$$t_{kr} = \frac{\delta_L}{\alpha \cdot E \cdot \cos \psi} \cdot \left(1 - \frac{\gamma}{\gamma_r}\right) - 5$$

$$1. \text{ za } a > a_{kr} \Rightarrow \delta_L = \delta_{nd} \Rightarrow t_{kr}$$

$$t_{kr} < 40^\circ\text{C} \Rightarrow f_m = f_{40^\circ\text{C}}$$

$$t_{kr} > 40^\circ\text{C} \Rightarrow f_m = f_{-5^\circ\text{C}+led}$$

$$2. \text{ za } a < a_{kr} \Rightarrow \delta_L = ?, \text{ iz } \delta_L^3 + A \cdot \delta_L^2 = B \Rightarrow t_{kr}$$

$$t_{kr} < 40^\circ\text{C} \Rightarrow f_m = f_{40^\circ\text{C}}$$

$$t_{kr} > 40^\circ\text{C} \Rightarrow f_m = f_{-5^\circ\text{C}+led}$$

2.1.7 Montažne krive

- Krive odnosno zavisnosti $\delta(t)$ i $f(t)$, nazivaju se montažnim krivama i koriste se za odredjivanje naprezanja i ugiba, pri montaži nadzemnog voda. Montaža se vrši obično po lepom vremenu, sem kada su havarije.

2.1.7 Montažne krive

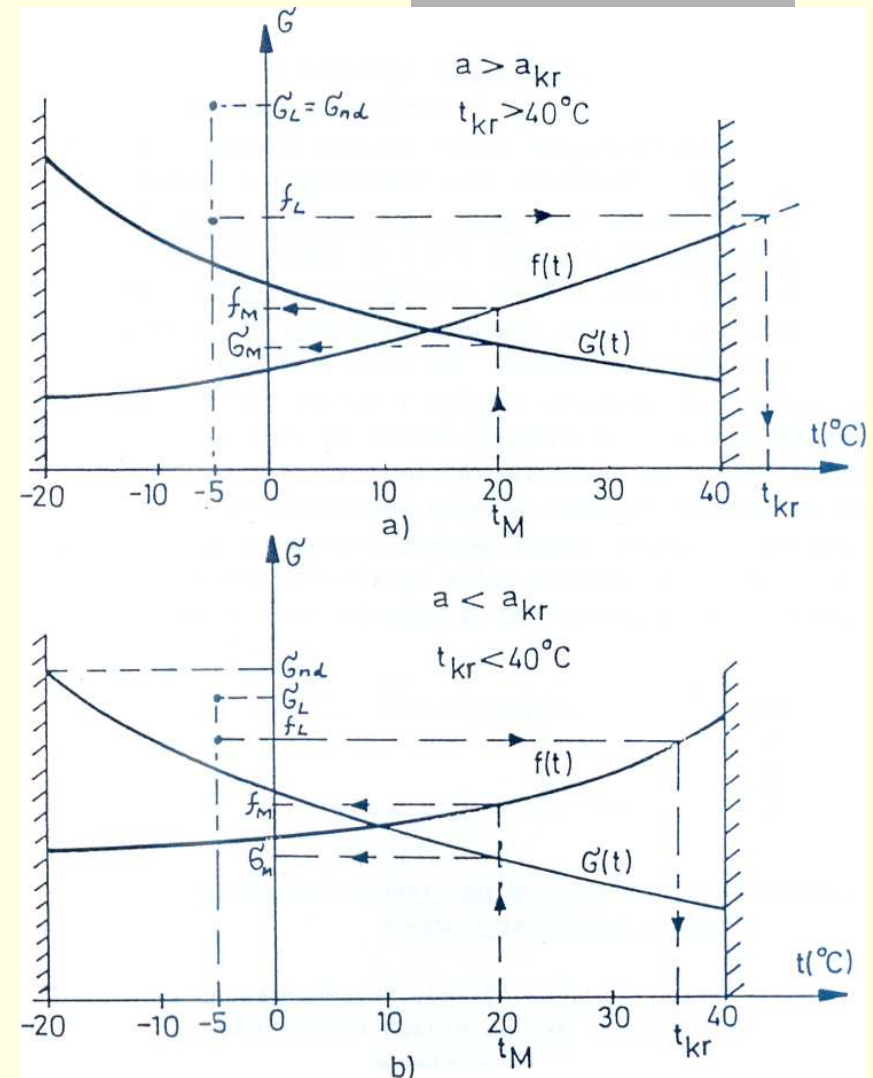
- Pri montaži, provodnici se pre konačnog pričvršćivanja za izolatore, stavljaju na koturače, koje su privremeno vezane za izolatore. Na ovaj način postiže se izjednačavanje naprezanja u svim rasponima jednog zateznog polja. Pre konačnog fiksiranja provodnika za izolatore, proveravaju se ugibi, a na zateznom ugibu se mere sile zatezanja provodnika pomoću dinamometra.

2.1.7 Montažne krive

- Potrebene vrednosti ugiba ili sile zatezanja očitavaju se sa montažnih krivih. Na slici su prikazane montažne krive za $a > a_{kr}$ i $a < a_{kr}$. Pretpostavljene vrednosti kritičnih temperatura su odabrane proizvoljno.

2.1.7 Montažne krive

- Montažne krive
 - a) u slučaju kada je raspon veći od kritičnog, i kada je kritična temperatura veća od $40(^{\circ}\text{C})$
 - b) u slučaju kada je raspon manji od kritičnog, i kada je kritična temperatura manja od $40(^{\circ}\text{C})$;
- t, f, σ -temperatura, ugib i naprezanje pri montaži



2.1.8 Mehanička sigurnost provodnika

- Za svaki raspon može se definisati koeficijent mehaničke sigurnosti provodnika kao odnos izuzetne dodatne specifične težine usled leda (γ_{id}^*) pri kojoj se u tačkama vešanja dostiže izuzetno dozvoljeno naprezanje (δ_{id}) i usvojene normalne dodatne specifične težine usled leda ($\gamma_{nd} = k \cdot \gamma_{nd \min}$).

2.1.8 Mehanička sigurnost provodnika

$$m^* = \frac{\gamma_{id}^*}{\gamma_{nd}} - \text{faktor mnogostrukosti dodatnog opterećenja}$$

$$\gamma_{ir}^* = \gamma + \gamma_{id}^* = \gamma + m^* \cdot \gamma_{nd} - \text{izuzetna rezultatna specifična težina usled leda}$$

2.1.8 Mehanička sigurnost provodnika

- Za izračunavanje m^* , polazi se od jednačine stanja provodnika, ako je:

1.) $a > a_{kr}$, stanje „0” pri kome se javlja maksimalno naprezanje provodnika je:

$t_0 = -5^{\circ}\text{C}$	$\delta_0 = \delta_{nd}$	$\gamma_0 = \gamma + \gamma_{nd}$
$t = -5^{\circ}\text{C}$	$\delta = \delta_{id}$	$\gamma = \gamma_{ir}^* = \gamma + m^* \cdot \gamma_{nd}$

2.1.8 Mehanička sigurnost provodnika

- Zamenom u:

$$\frac{a^2 \cdot \cos^2 \psi}{24} \cdot \left(\frac{\gamma^2}{\delta^2} - \frac{\gamma_0^2}{\delta_0^2} \right) = (t - t_0) \cdot \alpha + \frac{\delta - \delta_0}{E \cdot \cos \psi}$$

- Dobija se koeficijent mehaničke sigurnosti:

$$m^* = \frac{\delta_{id}}{\gamma_{nd}} \cdot \sqrt{\frac{24}{a^2 \cdot E \cdot \cos^3 \psi} \cdot (\delta_{id} - \delta_{nd}) + \left(\frac{\gamma + \gamma_{nd}}{\delta_{nd}} \right)^2} - \frac{\gamma}{\gamma_{nd}}$$

2.1.8 Mehanička sigurnost provodnika

2.) $a < a_{kr}$, stanje „0” pri kome se javlja
maksimalno naprezanje je:

$t_0 = -20^{\circ}C$	$\delta_0 = \delta_{nd}$	$\gamma_0 = \gamma$
$t = -5^{\circ}C$	$\delta = \delta_{id}$	$\gamma = \gamma_{ir}^* = \gamma + m^* \cdot \gamma_{nd}$

2.1.8 Mehanička sigurnost provodnika

- Zamenom u jednačinu stanja provodnika dobija se:

$$m^* = \frac{\delta_{id}}{\gamma_{nd}} \cdot \sqrt{\frac{24}{a^2 \cdot E \cdot \cos^3 \psi} \cdot (15 \cdot \alpha \cdot E \cdot \cos \psi + \delta_{id} - \delta_{nd}) + \left(\frac{\gamma}{\delta_{nd}}\right)^2} - \frac{\gamma}{\gamma_{nd}}$$

- Po propisu, najmanja dozvoljena vrednost $m = \frac{\gamma_{id}}{\gamma_{nd}}$, je 2, pr. ($m \geq 2$).

2.1.8 Mehanička sigurnost provodnika

- Na mestima ukrštanja nadzemnog voda sa drugim nadzemnim ili telekomunikacionim vodom, sa putem ili železničkom prugom propis definiše minimalnu vrednost koeficijenta mehaničke sigurnosti:
 - $m \geq 3$, za ukrštanje nadzemnog voda sa telekomunikacionim vodom
 - $m \geq 4$, za ukrštanje nadzemnog voda sa železničkom prugom

2.1.8 Mehanička sigurnost provodnika

$$m^* \geq m$$

- Koeficijent mehaničke sigurnosti (m^*), može se povećati smanjivanjem raspona ili izborom boljeg užeta (sa većim δ_{id})