

AMPACITA VENKOVNÍCH VEDENÍ

Ampacita (Ampere Capacity) = proudová zatížitelnost

- omezení – maximální dovolená provozní teplota vodiče; ta dána typem vodiče a provozním stavem
- vlivy – klimatické (teplota okolí, vítr, Slunce)
- další limity: mechanika (průhyb), magnetické pole, stabilita

Provozní teplota AlFe lan (ACSR – Aluminium Conductor Steel Reinforced)

dle ČSN EN 50341-3-19

- normální zatížení: 80°C
- krátkodobé zvýšení při zvláštním zatížení (až 150°C)
- při zkratu: 200°C

x předpisy výrobce, zhoršení optických a mechanických vlastností, průhyb

Tepelné modely venkovního vedení

Tepelná vodivost vodiče λ vysoká \rightarrow teplota vodiče uvažována konstantní po průřezu: T_{AV} ($^{\circ}\text{C}$)

Diferenciální rovnice pro teplotu vodiče

$$M \cdot c_p \frac{dT_{AV}}{dt} = P_J + P_S + P_M - P_R - P_C \quad (\text{W / m})$$

M poměrná hmotnost vodiče (kg/m)

c_p měrná tepelná kapacita ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

P_J Joulovy ztráty (W/m)

P_S výkon dodaný slunečním zářením (W/m)

P_M ohřev magnetickým polem (W/m)

P_R výkon odvedený sáláním (W/m)

P_C výkon odvedený konvekcí (W/m)

(také ohřev korónou, ochlazení odpařováním – obvykle neuvažujeme)

Střídavý odpor zohledňuje el. i mag. vlivy

$$P_Z = P_J + P_M = R_{ac} I^2 \quad (\text{W / m ; } \Omega / \text{m , A})$$

Ustálený stav – rovnice algebraická

$$\frac{dT_{AV}}{dt} = 0$$

Parametry AlFe lan

$$M = \rho_{Al} \cdot S_{Al} + \rho_{Fe} \cdot S_{Fe} \quad (\text{kg / m ; kg / m}^3, \text{ m}^2)$$

$$c_P = \frac{c_{Al} \cdot \rho_{Al} \cdot S_{Al} + c_{Fe} \cdot \rho_{Fe} \cdot S_{Fe}}{\rho_{Al} \cdot S_{Al} + \rho_{Fe} \cdot S_{Fe}} \quad (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$$

$$\rho_{Al} = 2703 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}, \quad \rho_{Fe} = 7780 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$c_{Al} = 897 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}, \quad c_{Fe} = 477 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Joulové ztráty

$$P_Z = I_P^2 \cdot R_{dc0} \cdot k_{ac} [1 + b(T_{AV} - T_0)] \quad (\text{W / m})$$

R_{dc0} měrný DC odpor (Ω/m) při teplotě T_0

T_0 referenční teplota, obvykle 20°C

b teplotní součinitel odporu (K^{-1})

$$b \approx 4 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

k_{ac} poměr mezi AC a DC odporem

$$k_{ac} = R_{ac} / R_{dc} > 1$$

Výkon dodaný slunečním zářením

$$P_S = a \cdot D \cdot I_{př} \sin \omega \quad (\text{W / m})$$

a koeficient pohltivosti (absorpce)
slunečního záření (-), $a \approx 0,5 \div 1$

D průměr vodiče (m)

$I_{\text{př}}$ přímé sluneční záření (W/m^2)

sluneční konstanta $I_0 \approx 1370 \text{ W} / \text{m}^2$

ω úhel mezi slunečními paprsky a osou vodiče ($^\circ$)

Výkon odvedený sáláním

$$P_R = \sigma \cdot \varepsilon \cdot \pi \cdot D \cdot \left[(T_{\text{AV}} + 273,15)^4 - (T_a + 273,15)^4 \right] \quad (\text{W} / \text{m})$$

T_a teplota okolí ($^\circ\text{C}$)

σ Stefanova-Boltzmannova konstanta

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

ε emisivita tepelného záření (-), $\varepsilon \approx 0,5$

Výkon odvedený konvekcí

$$P_C = \alpha \cdot \pi \cdot D \cdot (T_{AV} - T_a) \quad (\text{W} / \text{m})$$

α součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha = k_w \cdot \frac{\text{Nu} \cdot \lambda}{D} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$$

λ tepelná vodivost vzduchu ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

Nu Nusseltovo číslo (-)

volná konvekce $\text{Nu}_V = f(\text{Gr}, \text{Pr})$

nucená konvekce $\text{Nu}_N = f(\text{Re})$

k_w koeficient vlivu směru větru (-)

$$k_w = 1,194 - \sin \psi - 0,194 \cos 2\psi + 0,364 \sin 2\psi$$

ψ úhel mezi směrem větru a normálou
k vodiči

Vliv trojsvazku

P_Z – každý vodič 1/3 celkového proudu (ztrát)

P_S – beze změn, stínění proměnlivé

P_C – beze změn, mezní vrstva x cm

P_R – menší, částečné sálání na stejnou teplotu

$$k_{\text{rad}} = 1 - \frac{2 \cdot \text{Arctg}\left(\frac{D}{2l}\right)}{\pi}$$

l ... rozteč svazku (m)

→ menší ochlazování, nižší zatížitelnost (cca o 0,5%)

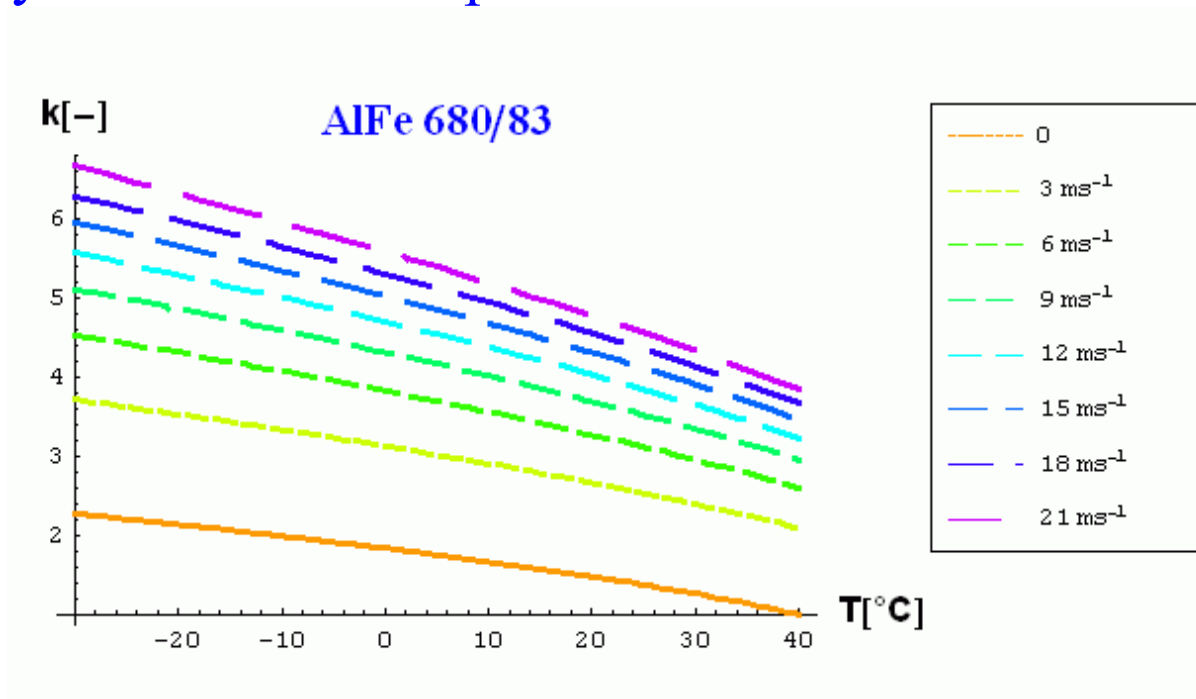
Ustálené stavy

Ampacita pro danou teplotu vodiče

$$I = \sqrt{\frac{P_R + P_C - P_S}{k_{\text{ac}} \cdot R_{\text{dc}}}} \quad (\text{A})$$

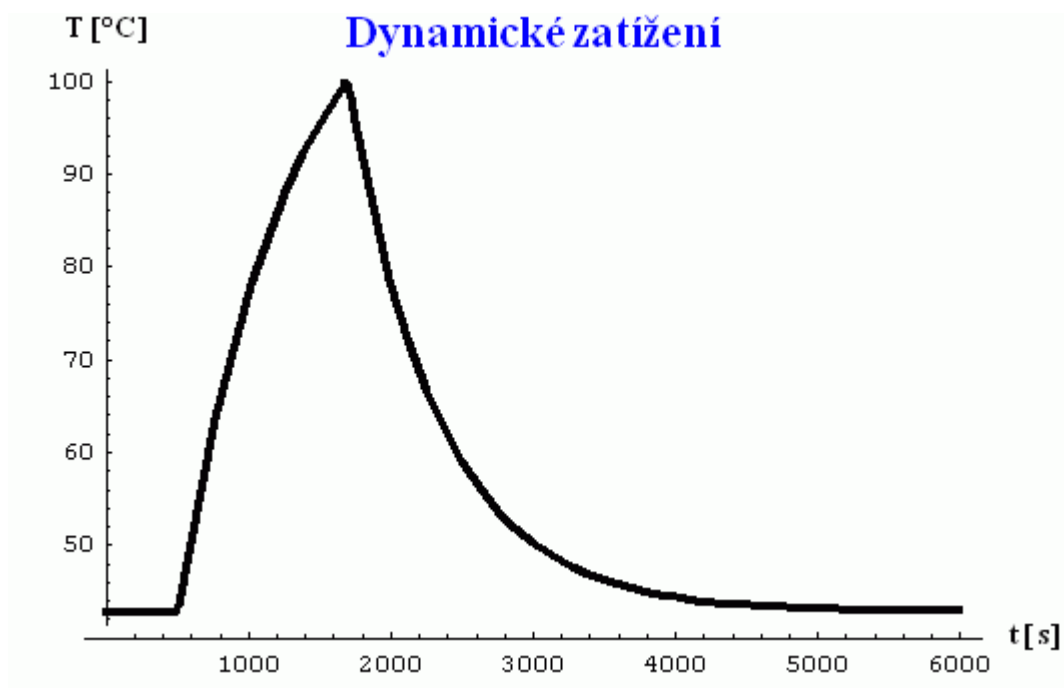
Ustálená teplota – algebraická rovnice 4. řádu

Vliv klimatických veličin na ampacitu



Dynamické stavy

- Změny v konfiguraci soustavy, výrobě, zatížení, 10x minut, akumulace tep. energie.
- Rychlost dějů závisí na tepelné časové konstantě: např. pro 434-AL1/59-ST1A $\tau_{\text{vod}} = 16,5 \text{ min}$.
- Př.: AlFe 680/83 přetěžováno 20 min do 100°C → dynamická ampacita 2292A.

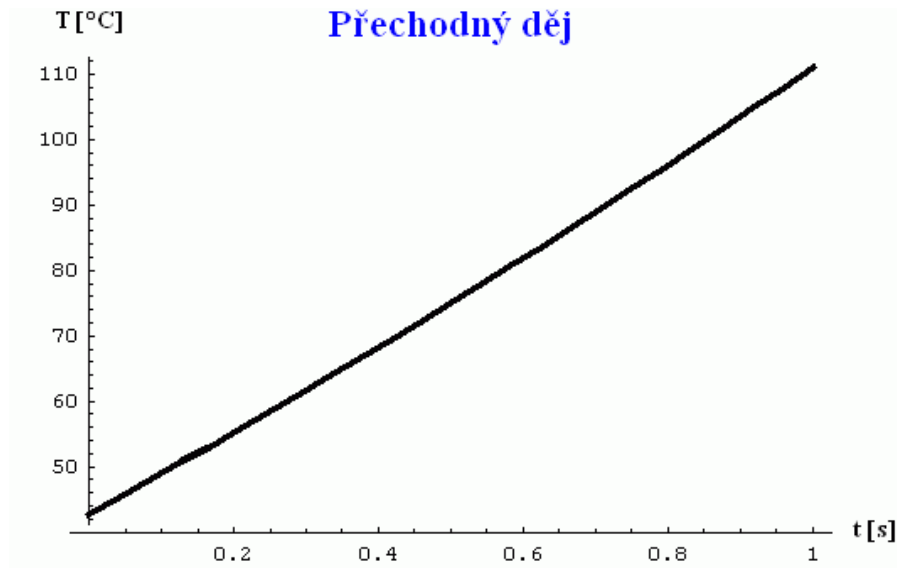


Přechodné děje

- Bleskové, zkratové proudy.
- Adiabatické podmínky
($P_S = 0, P_R = 0, P_C = 0$).

$$M \cdot c_P \frac{dT_{AV}}{dt} = P_Z = I_Z^2 \cdot R_{ac0} [1 + b(T_{AV} - T_0)] \quad (\text{W / m})$$

Př.: AlFe 680/83, zkrat 50kA po 1s



Zatížitelnost linek

Limitní faktory zatížení

- průhyb
- zařízení v rozvodně (MTP, ODP)
- lano

Měření teploty (průhybu)

- kontaktní
- měření mechanického napětí (CAT-1 – Nexans)
- termovize
- průhyb laserem → T
- fázorové měření → průměrná teplota
- mechanické vlastní kmity → průhyb → T (Ampacimon)
- průběžná teplota odrazem v optických vláknech (*Distributed Temperature Sensing*)

CAT-1

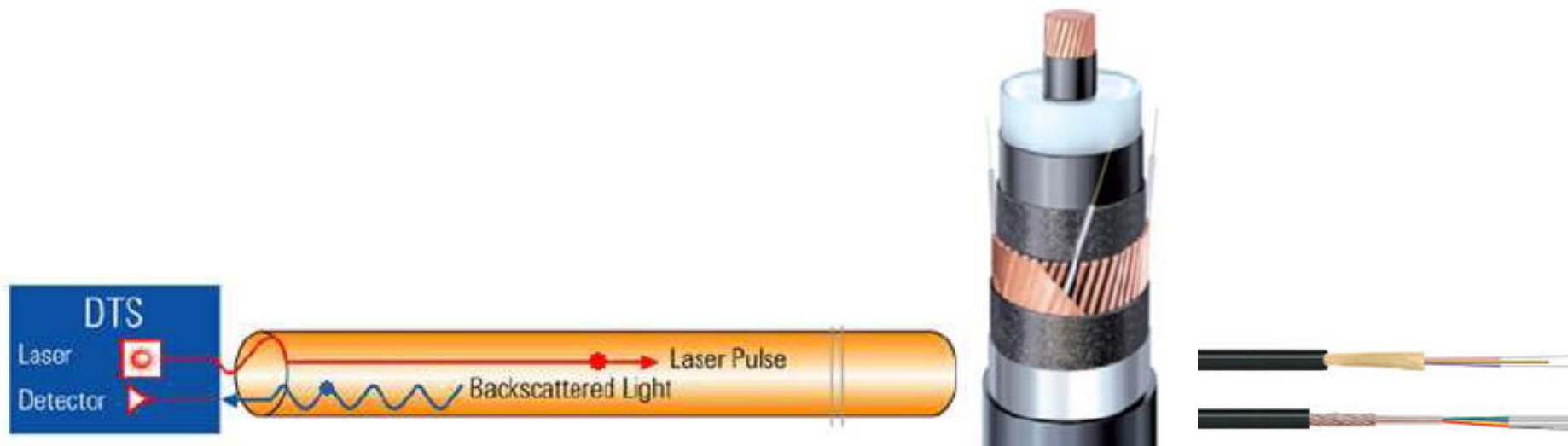


Ampacimon



DTS

AP Sensing



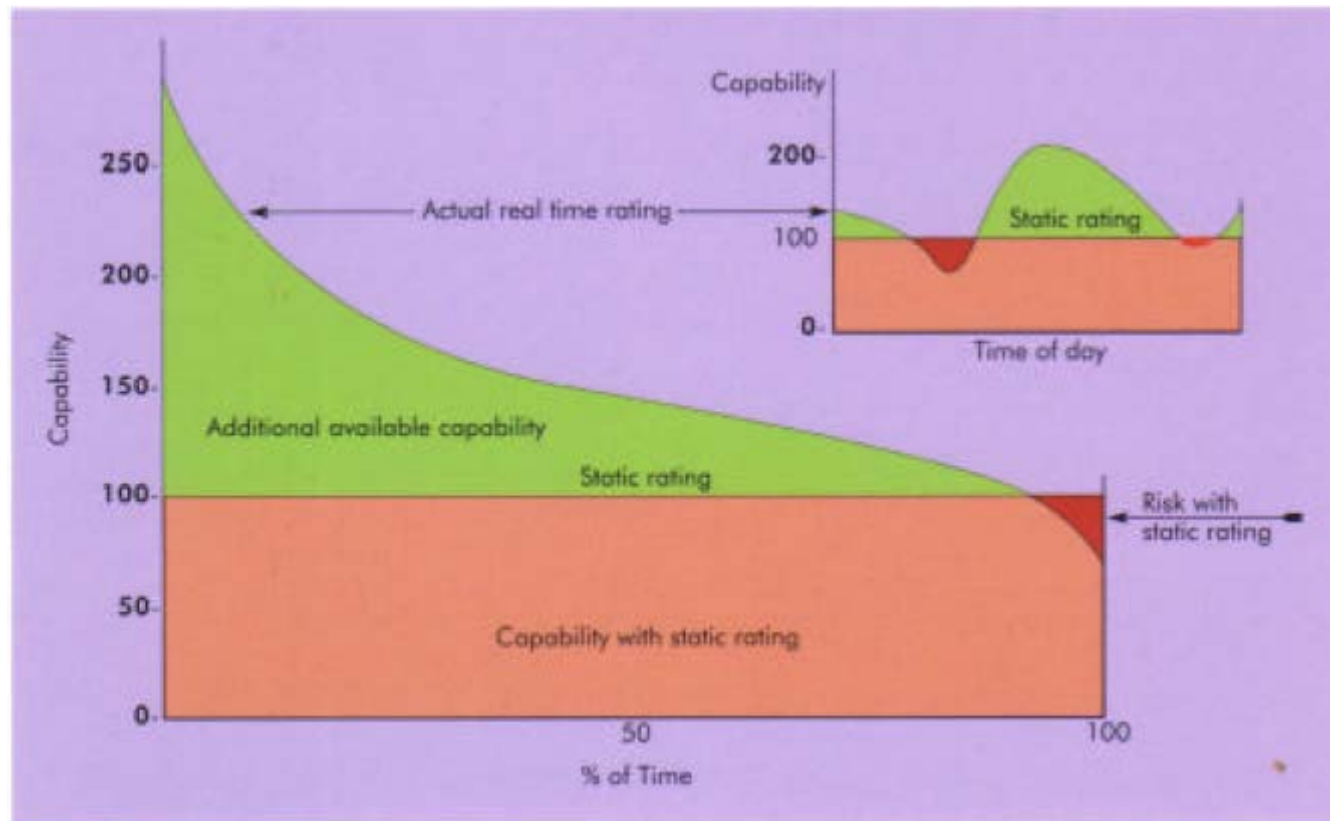
Valcap - NKT Cables



Zatěžování

- statické – konstantní limity, někdy léto x zima (nastavení ochran)
- dynamické (*dynamic line rating, real-time line rating*)
 - online – měření teploty vodičů → data do dispečinku → omezování zatížení
 - online – měření teploty vodičů + meteorologická data → tepelné modely pro rozhodování
 - offline – jen meteodata do modelů
 - predikční systémy založené na síti meteostanic (USA)
- normální x mimořádné stavy – rozhodovací čas pro dispečera

Dynamic Line Rating



Řízení zatížení

- rekonfigurace
- redispečink zdrojů
- FACTS
- mimořádné stavy (omezování odběrů)

Kritická místa a stavy

- vývody z elektráren
- mezinárodní propojení
- dlouhá „paralelní“ vedení
- tranzit x vnitřní zatížení
- OZE

Dimenzování vodičů

Přístupy stanovení hraničních podmínek

Klimatická veličina	Rozsah pracovních podmínek	Hraniční hodnoty		
		pod-kritické	kritické	mezní
T_a (°C)	-30 až 35	30	35	40
w_S (m/s)	0,6 až 30	1,34	0,6	0
I_{gm} (W/m ²)	0 až 800	800	800	1100

Podmínky dle ČSN EN 50341-3-19 pro stanovení nejvyšší návrhové teploty vodičů:

- teplota okolí 35 °C
- rychlost větru 0,5 m/s pod úhlem náběhu 45° na vodič
- globální intenzita slunečního záření 1000 W/m²
- součinitel absorpce 0,5
- součinitel emisivity 0,5

Zvyšování přenosových schopností „uprating“

Zvyšování	Metoda	Nástroj
Proudu	zvýšení teploty	zvětšení výšky závěsného bodu vodiče změna mechanického tahu ve vodiči
	výměna vodičů	kompaktní / hladké vodiče vysokoteplotní vodiče
	speciální metoda	statistické metody metody reálného času
Napětí	izolace	výměna / přídavných izolátorů modifikace uchycení
	vzdálenost vůči zemi	zvětšení výšky závěsného bodu vodiče změna mechanického tahu ve vodiči
	mezifázová vzdálenost	změna dvojitého vedení na jednoduché nová hlava stožáru

Vodiče pro venkovní vedení

Obvykle více materiálů, pevnost + vodivost.

Klasické vodiče

- ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced)
- AAAC (All-Aluminium Alloy Conductor)
 - pevnější než ACSR, odolnější proti korozi, odolnější povrch
- ACAR (Aluminium Conductor Alloy Reinforced)
 - při stejné hmotnosti jako ACSR větší zatížitelnost a mech. pevnost
- AACSR (Aluminium Alloy Conductor Steel Reinforced)
 - pro drsnější klima, přechody řek,...
- AAC (All Aluminium Conductor)
 - vysoká zatížitelnost, pro krátká rozpětí



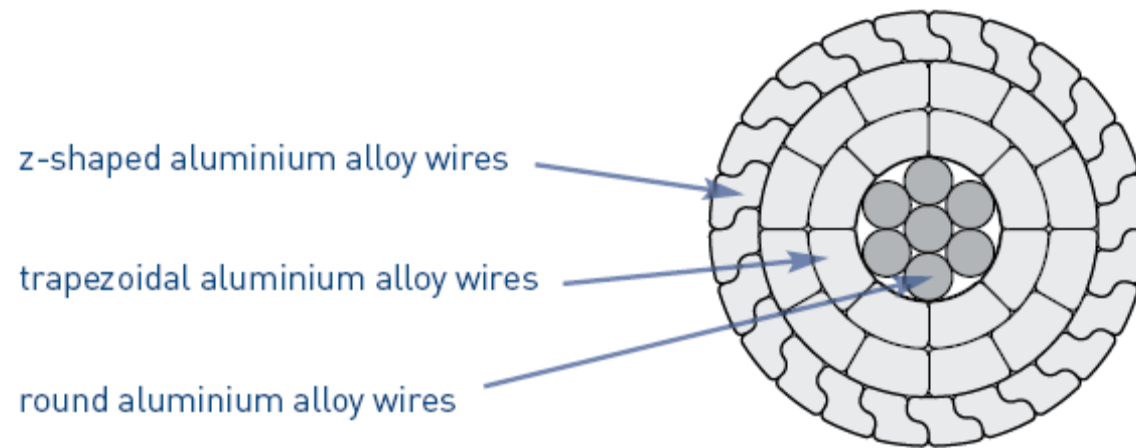
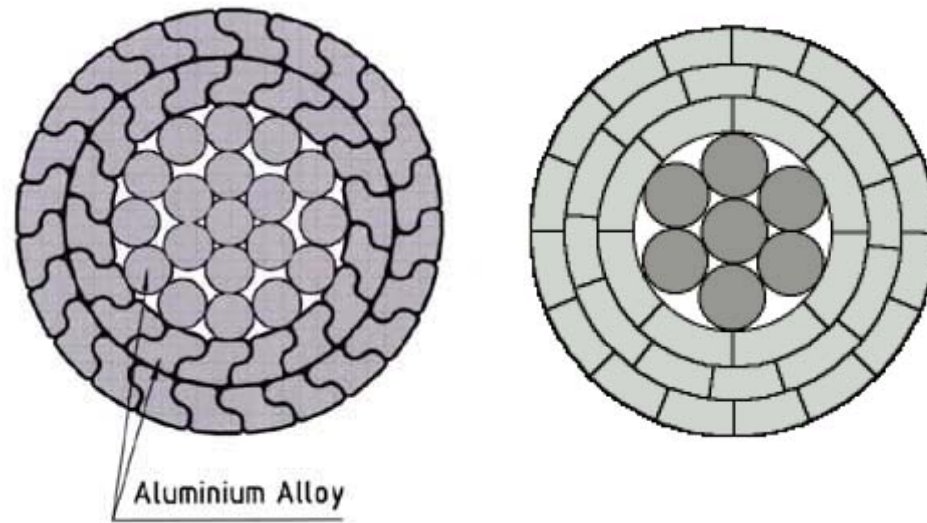
Kompaktní vodiče – „bez vzduchových mezer“, extrémně až „sheath-type“
– plný materiál;

o vodivější x těžší, stačí menší průměr, nižší ztráty, vyšší odolnost
proti větru (omezení tančení vodičů), omezení koroze (nižší ztráty
maziva), omezení námrazy

- sheath-type – menší průměry, kratší rozpětí



- kompaktní profily: ACSR/TW, AERO-Z



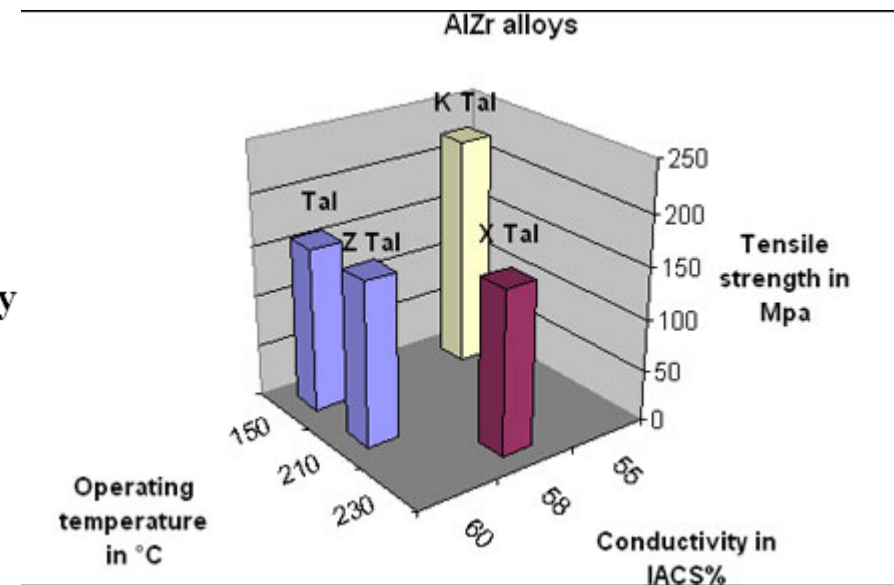
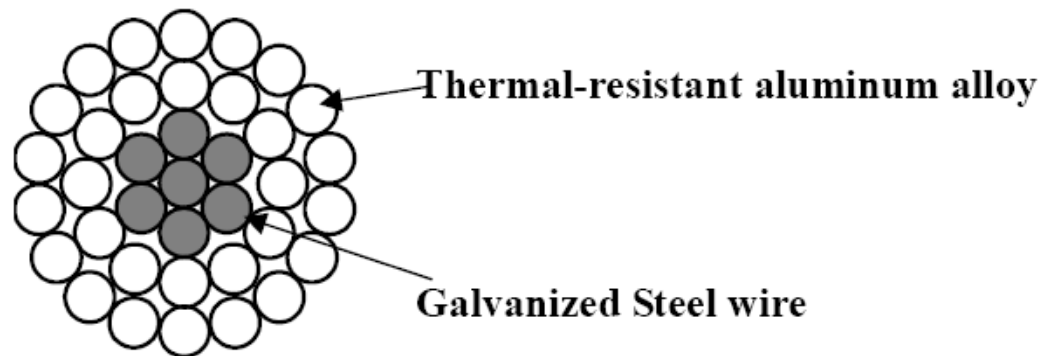
Vysokoteplotní vodiče

- slitiny hliníku a zirkonu s pevností do vyšších teplot (TAI, ZTAI, XTAI)

→ např. TACSR

Dovolená ustálená teplota

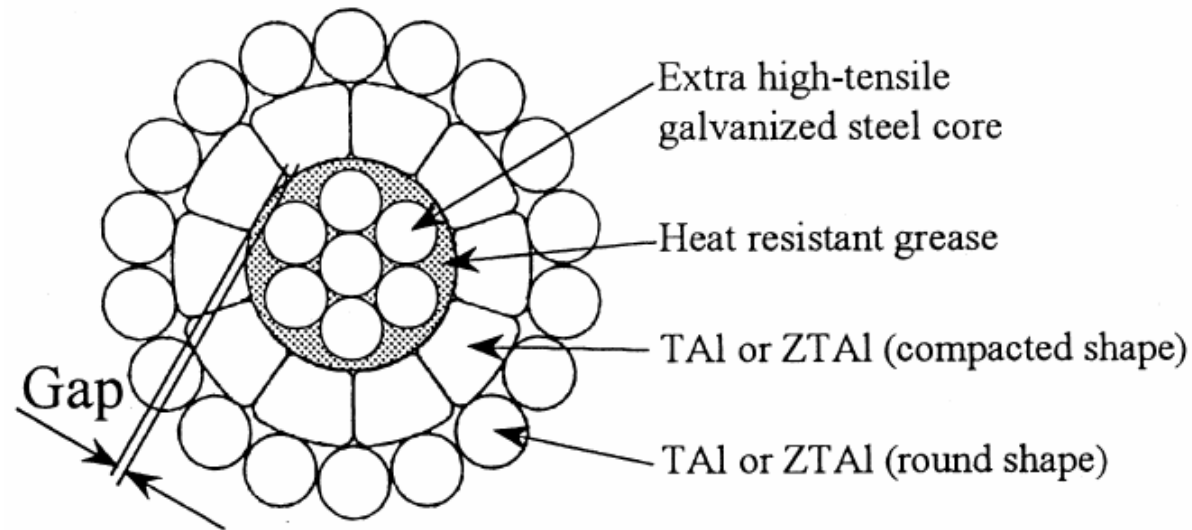
TAI: 150°C, ZTAI: 210°C, XTAI: 230°C



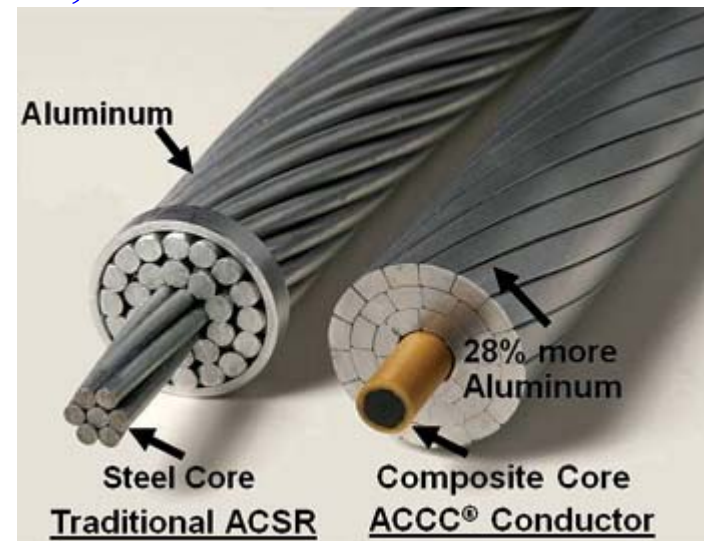
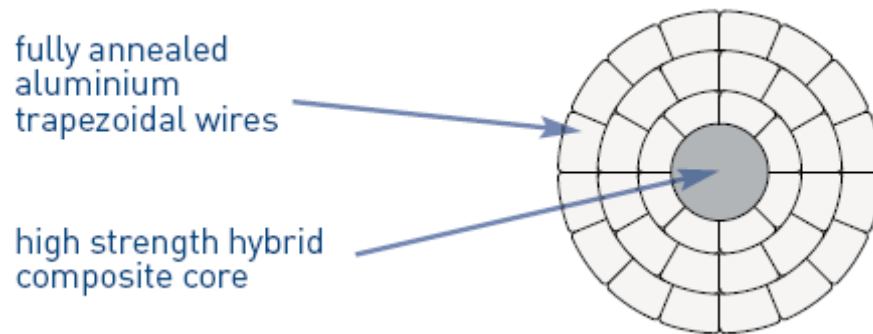
- pevnost dána oběma materiály až do přechodového bodu (knee-point), pak jen jádro, $T_{kn} \approx 100^\circ\text{C}$

- nízká roztažnost jádra: Invar (Fe + Ni), 1/3 oproti oceli, cca $3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, malý průhyb x nižší pevnost (pro kratší rozpětí) → např. TACIR

- vodiče s mezerou mezi Fe a Al: GZTACSR (Gap-type ZT-Aluminium Conductor Steel Reinforced) – tahem namáháno pouze jádro, tj. roztažnost jádra ($11,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ pro Fe x $18 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ u AlFe)



- kompozitní materiály: ACFR (Aluminium Conductor Carbon Fibre Reinforced), ACCC (Aluminium Conductor Composite Core)
 - o kompozit uhlíkových a skleněných vláken, vysoká pevnost, malá délková roztažnost, bez koroze, dlouhá rozpětí (až 2,5 km), lehký, nižší ztráty, více Al, do 150°C

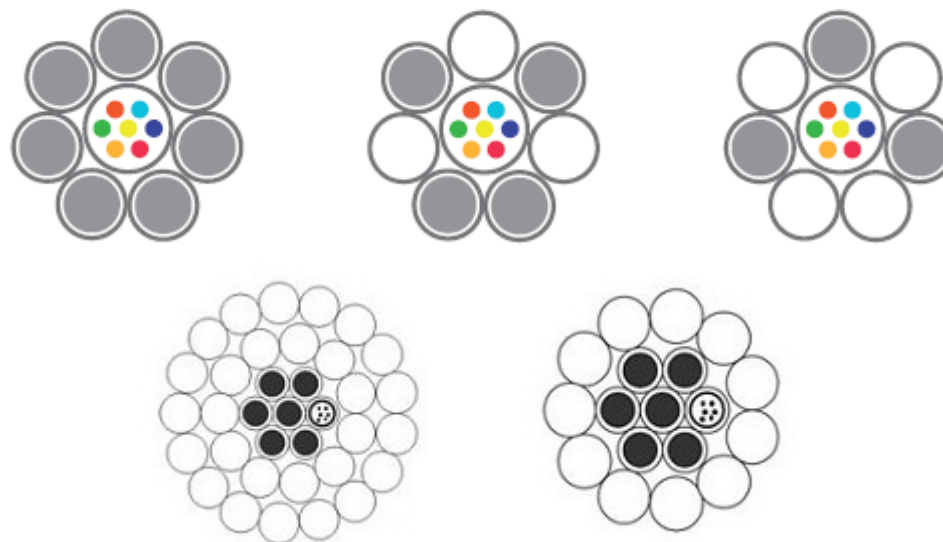


- ACSS (Aluminium Conductor Steel Supported) – jádro pokryto Zn-Al proti korozi, nese plné zatížení, plášť ze žíhaného hliníku, do 200°C
- optická vlákna: OPGW (Optical Ground Wire) – nejčastěji v zemnicích lanech, komunikace

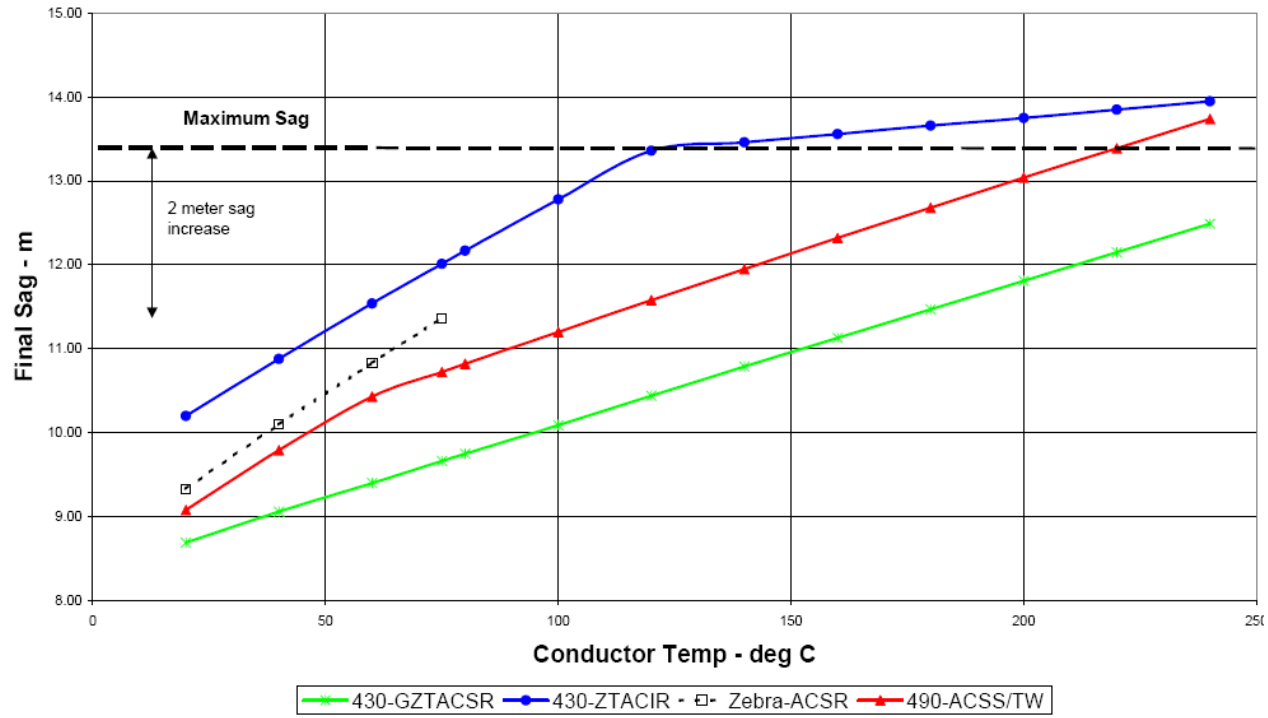
Konstrukce OPGW se slaněnou trubičkou



Konstrukce OPGW se středovou trubičkou



Case 1 - Final Sag vs Conductor Temperature



Porovnání vlastností nejpoužívanějších slitin hliníku

Slitina hliníku		Vodivost (%)	Minimální únosnost v tahu (MPa)	Povolená provozní teplota (°C)	
				Ustálená	Pohotovostní
Tvrký	1350-H19	61,2	159 – 200	90	120
Tepelně odolný	TAL	60	159 – 176	150	180
Zvlášt' tepelně odolný	ZTAL	60	159 – 176	210	240
Plně žíhaný	1350-0	63	59 – 97	200 – 250	250

Porovnání vlastností nejpoužívanějších ocelí

	Minimální únosnost v tahu (MPa)	Modul pružnosti (GPa)	Koeficient lineární roztlačnosti ($\times 10^{-6}$)
Galvanizována ocel HS Galvanizována ocel EHS	1230 – 1320 1765	206	11,5
AC ocel plátovaná Al 20,3 % I.A.C.S	1103 – 1344	162	13,0
Zinc – 5 % Al Mischmetal Standart HS	1380 – 1450 1520 – 1620	206 (počáteční) 186 (konečný)	11,5
Galv. Invar	1030 – 1080	162	2,8 – 3,6

Porovnání vlastností dalších materiálů jádra

Material	Density	σ_R (//)	Specific strength (//)	Elastic modulus	Thermal expansion (//)	T_{MAX}
	kg/dm ³	MPa	MPa*dm ³ /kg	GPa	10 ⁻⁶ /°C	°C
Steel	7,8	1500	192 (<i>reference</i>)	205	11,5	>300
Al alloy	2,7	325	120 (-37%)	65	23	80
Metal matrix Composite	3,4	1600	470 (+144%)	240	7	300
Carbon Fiber Composite	1,7÷1,8	2200	1250 (+550%)	150	<1	200