

Elektrická vedení

Miloslava Tesařová

Západočeská univerzita v Plzni
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Parametry vedení – náhradní schéma

Pasivní parametry vedení:

- činný odpor R [Ω],
- indukčnost L [H],
- kapacita C [F],
- svod (svodová vodivost) G [S].

Podélná impedance vedení

$$\bar{Z} = R + j\omega L = R + jX \quad [\Omega]$$

Příčná admitance vedení

$$\bar{Y} = G + j\omega C = G + jB \quad [S]$$

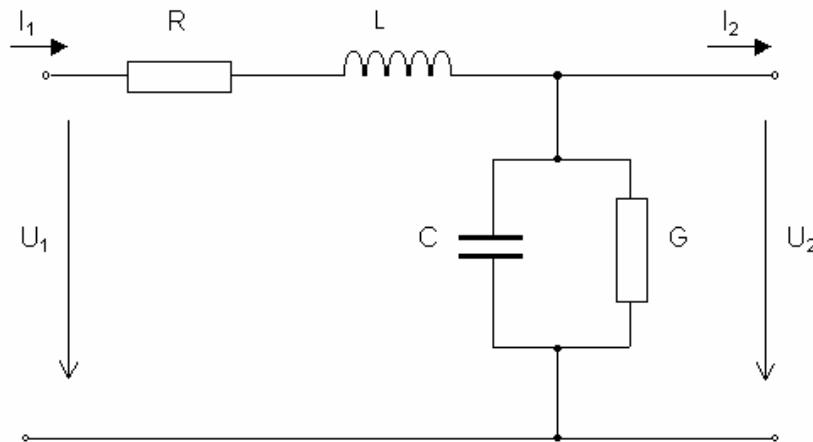
Vlnová impedance vedení

$$Z_v = \sqrt{\frac{\bar{Z}}{\bar{Y}}} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$$

ideální vedení $R=0$ a $G=0$

$$Z_v = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Γ - článek

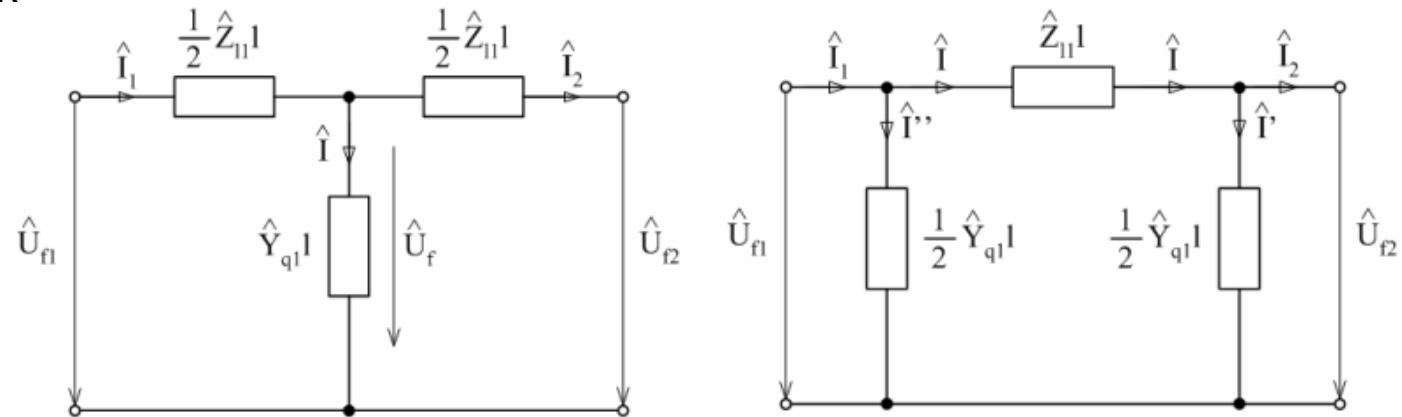


venkovní vedení $Z_v = 250 \div 400 \Omega$
kabelová vedení $Z_v = 35 \div 70 \Omega$

Parametry vedení – náhradní schéma

Další náhradní schémata vedení

T- článek a Π -článek



Nahrazují vedení do délky cca 300 km

Zjednodušení náhradního schéma vedení:

- Stejnosměrná vedení – pouze R
- Střídavá vedení NN a VN pak dva parametry – R a X (u kabelů NN lze X zanedbat)
- Střídavá vedení VVN a ZVN budou brány v úvahu všechny čtyři parametry vedení, při jednoduchých výpočtech a výpočtech zkratů pouze R a X

Při modelování se preferují Γ - článek a Π -článek – menší počet uzlů, nižší nároky na výpočtové algoritmy

Parametry vedení – náhradní schéma

Delší vedení než 300 km – vedení s rozprostřenými parametry

Vlnová impedance vedení

$$\bar{Z}_v = \sqrt{\frac{\bar{Z}_1}{\bar{Y}_1}} = \sqrt{\frac{R_1 + j \omega L_1}{G_1 + j \omega C_1}}$$

Konstanta přenosu $\bar{\gamma} = \beta + j\alpha = \sqrt{(R + jX) \cdot (G + jB)} = \sqrt{\bar{Z} \cdot \bar{Y}}$

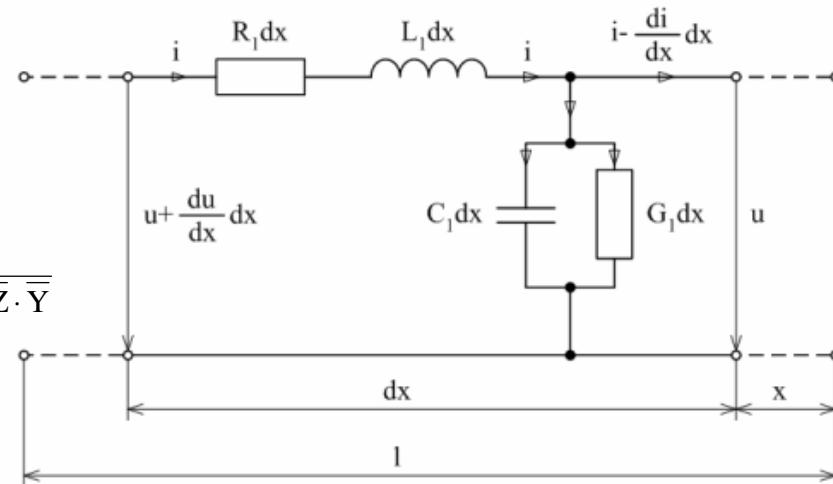
β ... činitel tlumení

α ... činitel fázového natočení

$$\hat{U}_{f1} = \hat{U}_{f2} \cosh \hat{\gamma}l + \hat{Z}_v \hat{I}_2 \sinh \hat{\gamma}l$$

$$\hat{I}_1 = \frac{\hat{U}_{f2}}{\hat{Z}_v} \sinh \hat{\gamma}l + \hat{I}_2 \cosh \hat{\gamma}l$$

$$\begin{pmatrix} \hat{U}_{f1} \\ \hat{I}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{A} & \hat{B} \\ \hat{C} & \hat{D} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{U}_{f2} \\ \hat{I}_2 \end{pmatrix}$$



Zadány hodnoty na začátku vedení

$$\begin{pmatrix} \hat{U}_{f2} \\ \hat{I}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{D} & -\hat{B} \\ -\hat{C} & \hat{A} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{U}_{f1} \\ \hat{I}_1 \end{pmatrix}$$

A, B, C, D – Blondelovy konstanty

Vlnová impedance vedení

Vlnová impedance vedení

- nezávisí na délce vedení, ale na konstrukci vedení (průřez vodiče, výška a vzdálenost vodičů)

$$Z_v = \sqrt{\frac{\bar{Z}}{\bar{Y}}} = \sqrt{\frac{R + j \omega L}{G + j \omega C}}$$

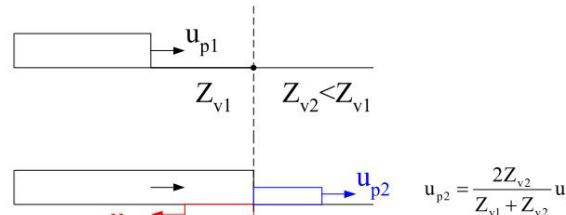
ideální vedení $R=0$ a $G = 0$

$$Z_v = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

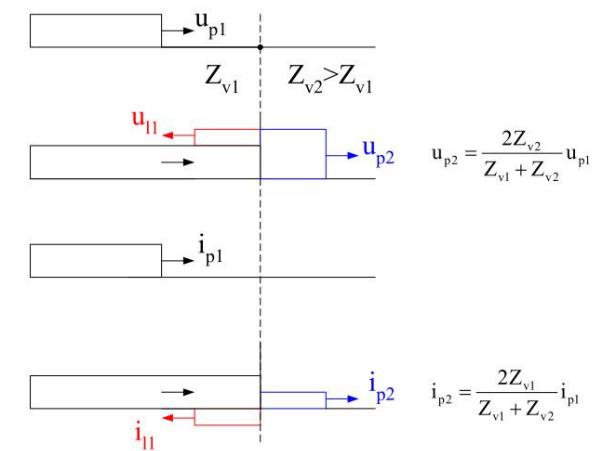
venkovní vedení $Z_v = 250 \div 400 \Omega$

kabelová vedení $Z_v = 35 \div 70 \Omega$

Rozhraní vedení – kabel
($Z_{v1} \approx 400 \Omega$; $Z_{v2} \approx 40 \Omega$)



Rozhraní kabel – vedení



Při přechodech „venkovní vedení – kabel“ a „kabel – venkovní vedení“ dochází k odrazům vln U a I.

Přenos s přirozeným výkonem vedení

- homogenní vedení zatížené na svém konci vlnovou impedancí $\bar{Z}_v \Rightarrow$ nedochází k odrazu vln na konci vedení
- napětí na konci vedení $\bar{U}_{f2} = \bar{Z}_v \cdot \bar{I}_2$
- velikost přenášeného výkonu, tzv. **přirozený výkon vedení**

$$\hat{S}_{p2} = 3\hat{U}_{f2}\hat{I}_2^* = 3\hat{U}_{f2}\left(\frac{\hat{U}_{f2}}{\hat{Z}_v}\right)^* = \frac{U_2^2}{\hat{Z}_v^*}$$

- pokud uvažujeme ideální (bezeztrátové) vedení, kdy $R=0$ a $G=0$, přirozený výkon je činného charakteru

$$P_{pr} = S_{pr} = 3 \cdot U_f \cdot I = 3 \cdot U_f \cdot \frac{U_f}{Z_v} = 3 \cdot \frac{U_f^2}{Z_v} = \frac{U_n^2}{Z_v}$$

výkon má činný charakter (energie mag. pole a el. pole se vyruší), samokompenzace

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}C \cdot U^2 &= \frac{1}{2}L \cdot I^2 \\ \left(\frac{U}{I}\right)^2 &= Z_v^2 = \frac{L}{C} \Rightarrow Z_v = \sqrt{\frac{L}{C}} \end{aligned}$$

Přenos s přirozeným výkonem vedení

Pokud uvažujeme ideální (bezeztrátové) vedení, kdy $R=0$ a $G=0$

- při přenosu přirozeného výkonu jsou velikosti napětí na začátku a na konci vedení stejně velká $U_{1f} = U_{2f}$ (dochází pouze k fázovému pootočení napětí na konci vedení)
- účinnost přenosu je rovna 1, tzn. nevznikají na něm žádné ztráty

Přirozený výkon = nejoptimálnější velikost přenášeného výkonu

Venkovní vedení: $Z_v \approx 250$ až 400Ω

Kabelová vedení: $Z_v \approx 35$ až 70Ω

- cca 10x vyšší u kabelových vedení, tzn. vyšší zatížitelnost

$$P_{př} = \frac{U_n^2}{Z_v} = U_n^2 \cdot \sqrt{\frac{C}{L}}$$

napětí	22 kV	110 kV	220 kV	400 kV
kabelové vedení	12 MW	300 MW	1 200 MW	-----
venkovní vedení	1,2 MW	30 MW	120 až 160 MW	400 až 580 MW

Př: vedení 400 kV

$L = 1 \text{ mH/km}$

$C = 11,7 \text{ nF/km}$

$$Z_v = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{1 \cdot 10^{-3}}{11,7 \cdot 10^{-9}}} = 292 \Omega$$

$$S_{př} = \frac{U_n^2}{Z_v} = \frac{400^2}{292} = 548 \text{ MVA}$$

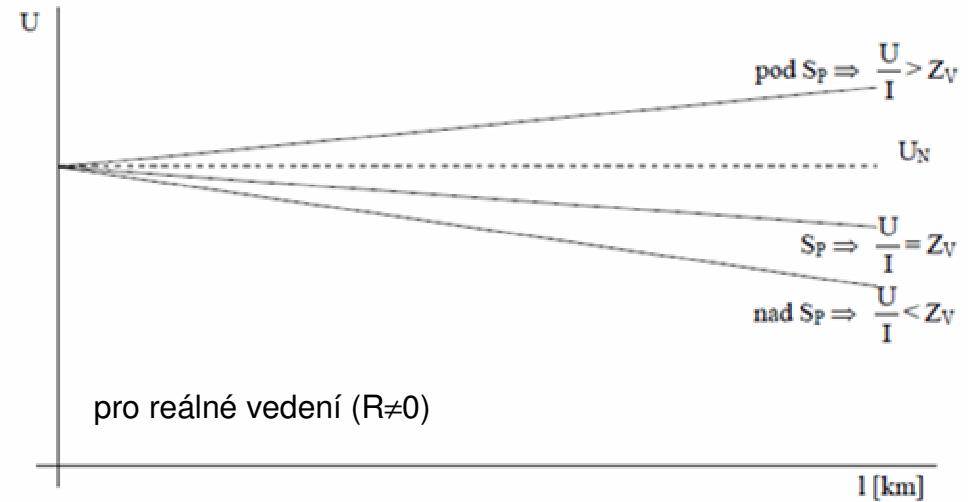
Přenos s přirozeným výkonem vedení

Diagram přenášených výkonů:

$$P > P_{pr} \rightarrow U_1 > U_2$$

$$P < P_{pr} \rightarrow U_1 < U_2$$

$$P = P_{pr} \rightarrow U_1 = U_2$$



Provoz vedení :

střední vzdálenosti (až 300 km): zatížení vedení $> P_{pr}$ kvůli vyššímu využití průřezu vodičů
delší vzdálenosti: zatížení vedení se blíží $P_{pr} \rightarrow$ nižší ztráty, vyšší stabilita přenosu

Zvýšení P_{pr}

$$P_{pr} = \frac{U_n^2}{Z_v} = U_n^2 \cdot \sqrt{\frac{C}{L}}$$

- zvýšení napětí
- snížení vlnové impedance (duté vodiče, svazkové vodiče, větší poloměr vodiče,...)

Přenos s přirozeným výkonem vedení

Zvýšení P_{pr}

- zvýšení napětí
- snížení vlnové impedance (duté vodiče, svazkové vodiče, větší poloměr vodiče,...)

Provoz vedení při P_{pr} :

- nižší ztráty
- nejvyšší stabilita
- přenos na střední vzdálenosti (200 až 300 km): přenášený výkon je větší než P_{pr} kvůli využití průřezu vodičů vedení
- přenos na delší vzdálenosti: přenášený výkon se blíží P_{pr}

Skutečný přirozený výkon: komplexní veličina

Nezatížené vedení - Ferrantiho jev

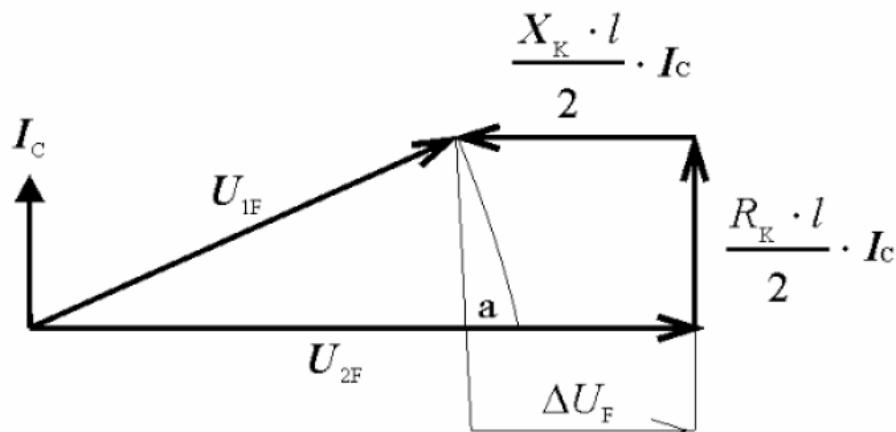
- přenášený výkon je menší než přirozený
- napětí na konci vedení je vyšší než na začátku vedení (vedení naprázdno, málo zatížené vedení)
- vedením protéká velký kapacitní nabíjecí proud, který je dán kapacitou vedení VVN a ZVN (ve stavu naprázdno je vedení zatíženo pouze příčnými kapacitními admitancemi)

$$I_c = \omega \cdot C \cdot U_f$$

- vedení odebírá tzv. **nabíjecí výkon vedení** $Q_c = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_c = \omega \cdot C \cdot U_n^2$

Vektorový diagram:

napětí	22 kV	110 kV	220 kV	400 kV
Qc (kVAr/km)	1,4	32	129	610



Nezatížené vedení - Ferrantiho jev

Příklad:

Jak se zvýší napětí na konci vedení 400 kV o délce 300 km při jeho náhlém odlehčení?

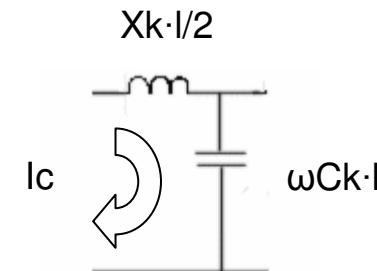
$C_k = 11,7 \text{ nF/km}$; $X_k = 0,314 \Omega/\text{km}$; R_k – zanedbán; G_k – zanedbán

Vedení nahrazeno vedením s rozprostřenými parametry – nekonečný počet Γ - článků
Na počátku vedení teče proud I_c , na konci je proud nulový – vedení naprázdno

Rovnoměrně rozložené zatížení – náhrada vedením o poloviční délce procházený proudem I_c

$$\Delta U \approx U_{2f} - U_{1f} \approx I_c \cdot \frac{X}{2} = \frac{1}{2} \omega \cdot C_k \cdot l \cdot U_f \cdot X_k \cdot l = \\ = 0,5 \cdot 314 \cdot 11,7 \cdot 10^{-9} \cdot 300 \cdot \frac{400 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \cdot 0,314 \cdot 300 = \frac{21}{\sqrt{3}} \text{ kV}$$

$$U_2 = U_1 + \Delta U = 400 + 21 = 421 \text{ kV} \Rightarrow \text{Přepětí na konci vedení}$$



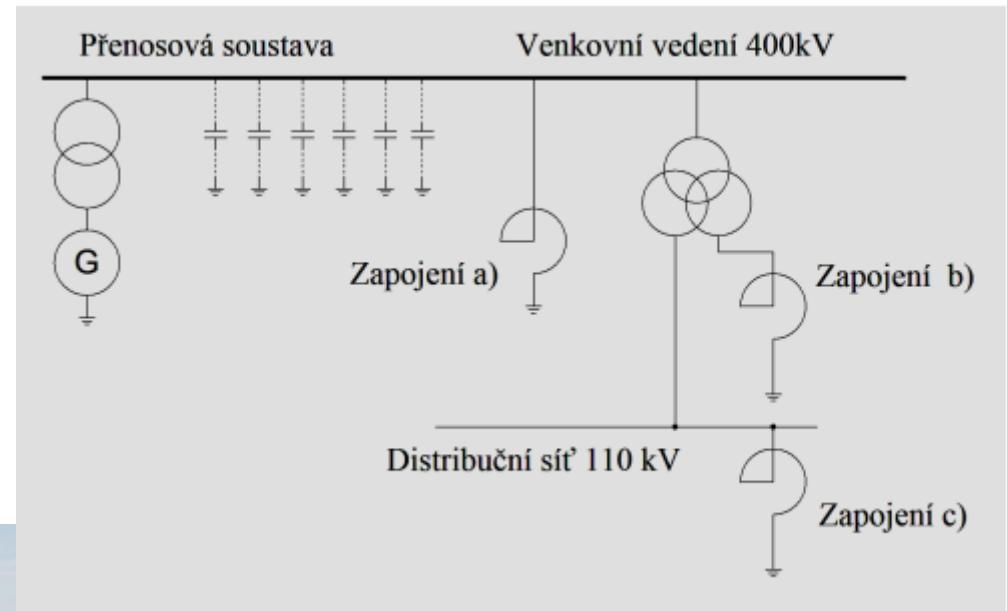
V napájecích rozvodnách se udržuje napětí vyšší než $U_n \rightarrow$ na konci vedení ještě vyšší přepětí.

Nezatížené vedení - Ferrantiho jev

Dekompenzace nabíjecího výkonu

- paralelní tlumivka

Kompenzační tlumivky 90 MVar, 10,5kV



Přenosová schopnost vedení

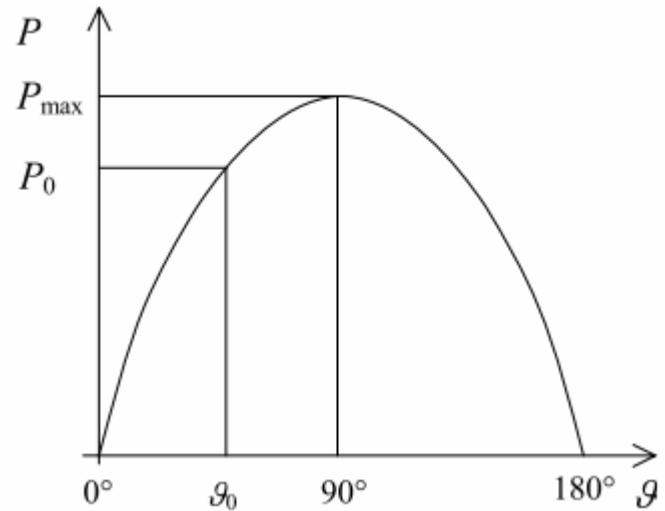
Činný výkon P přenášený vedením

$$P = \frac{U_1 \cdot U_2}{X_v} \cdot \sin \vartheta = \frac{U_n^2}{Z_v} \cdot \sin \vartheta$$

Zátěžný úhel mezi vnitřním napětím generátoru a napětím na konci vedení při plném zatížení nemá být větší než 60° .

generátor + trafo $\vartheta = 30^\circ$
na vedení zůstává úhel 30°

Pro venkovní vedení $\vartheta \sim 6^\circ$ na 100 km délky → kritická délka vedení 400-500 km



$\vartheta = 90^\circ$ - mez statické stability

Venkovní vedení

Venkovní vedení

- síť 400 kV, 220 kV, 110 kV, část sítí 22 kV a 35 kV, síť NN – zejména venkov

Charakteristika venkovního vedení:

- skládá se ze stožárů, izolátorů, holých vodičů (mohou být i izolované vodiče) a další výzbroje (ochranná jiskřiště, tlumiče kmitů, ochrany proti dosedu ptáků ...)
 - induktivní reaktance X_L (L) je vyšší než u kabelů
 - kapacitní susceptance B (C) je nižší než u kabelů
 - úbytek napětí ΔU a jalové ztráty ΔQ jsou vyšší vlivem vyšší reaktance
 - poruchovější, poruchy většinou přechodného charakteru
 - atmosférické vlivy – bouřky, vítr, námraza
 - 90% všech poruch je přechodného charakteru – použití automatiky opětného zapínání (OZ)
 - 90% poruch je jednofázových
 - jednoduché vyhledávání poruch
 - možnost izolování holých vodičů (snížení vzdáleností vodičů ve stísněných místech, průsečích v lesích) 22 kV: vzdálenost vodičů cca 1,5 m → 0,5 m
-

Venkovní vedení

Charakteristika venkovního vedení:

- levnější než kabelové vedení
 - kabelové vedení VVN až 10-20 x dražší
 - kabelové vedení VN cca 4 x dražší
 - kabelové vedení NN zhruba stejně drahé (včetně pokládky a výkopových prací)
- environmentální dopad – úhyby ptáků
- vyšší nároky na prostor

Ochranné pásmo

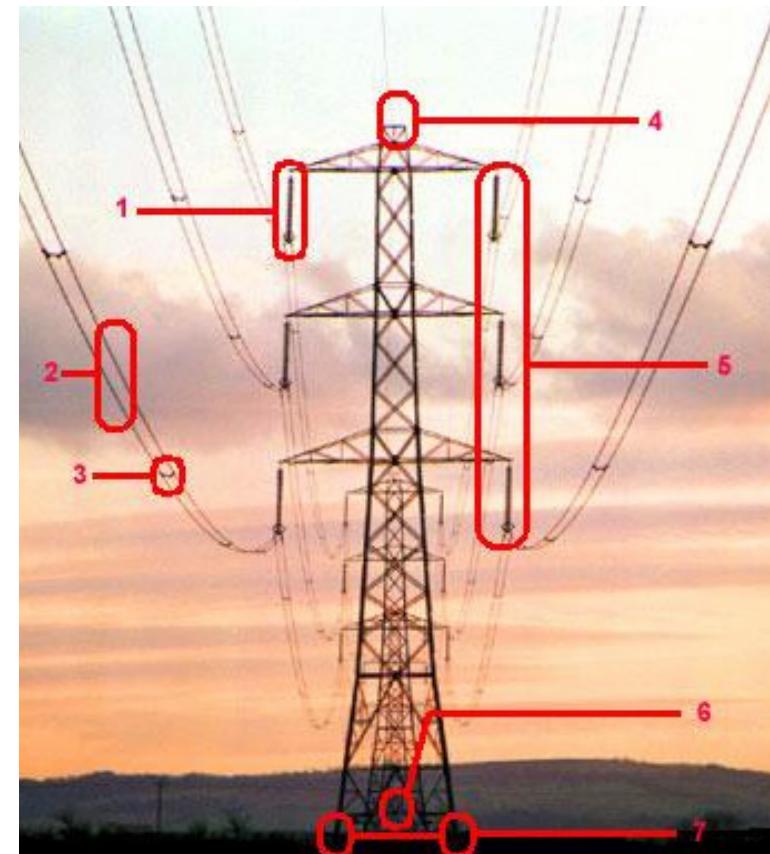
	Ochranné pásmo
400 kV	20 m
220kV	15 m
110 kV	12 m
22 kV a 35 kV	7 m



Venkovní vedení

Dvojité venkovní vedení VVN

- 1 ... izolátor závěsný
- 2 ... svazkový vodič (dvojsvazek ze 2 lan)
- 3 ... rozpěrka svazkového vodiče
- 4 ... uchycení zemnicího lana
- 5 ... uchycení fázových vodičů jedné linky vedení
- 6 ... označení stožáru
- 7 ... paty příhradového stožáru (uzemnění)



Vodiče pro venkovní vedení

Vodiče

- měď Cu
- hliník Al a jeho slitiny hliníku (příměsi Mg, Si, Fe)
- ocel
- pro speciální účely: bronz atd.

Požadavky na vodiče pro venkovní vedení:

- malá měrná hmotnost vodičů kvůli dopravě a montáži, ale velká, aby nebyly příliš vychylovány větrem
- malý průměr vodičů omezující účinky větru, ale velký pro snížení ztrát korónou
- velká mechanická pevnost
- odolnost proti chemickým vlivům a změnám teploty
- odolnost proti chvění
- nízká cena

⇒ Požadavky jsou protichůdné

Vodiče pro venkovní vedení

Dráty do 1 kV

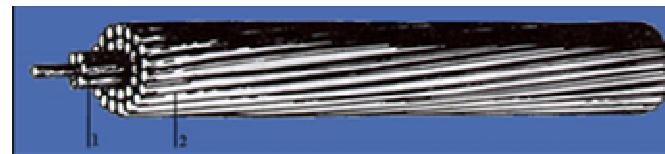
- měď, hliník, železo

Lana prostá

- Al, Cu, Fe, bronz

Lana kombinovaná

- AlFe X (poměr průřezu Al:Fe), CuFe
- KZL (kombinované zemnící lano)



AlFe lana (ACSR) – kombinovaná lana, kde nosný materiál je Fe, a proudovodný Al

Př. AlFe 6 ... 1 díl Fe

6 dílů Al

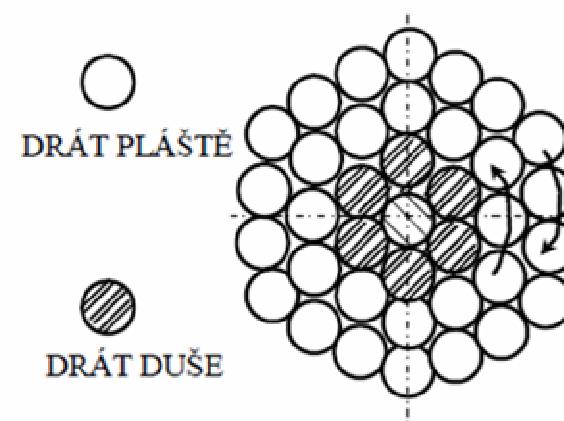
AlFe 6 240 znamená: 240 ... průřez Al [mm²]

40 mm² průřez Fe

6 ... poměr Al / Fe

matematický průřez je tedy $240 + 40 = 280 \text{ mm}^2$

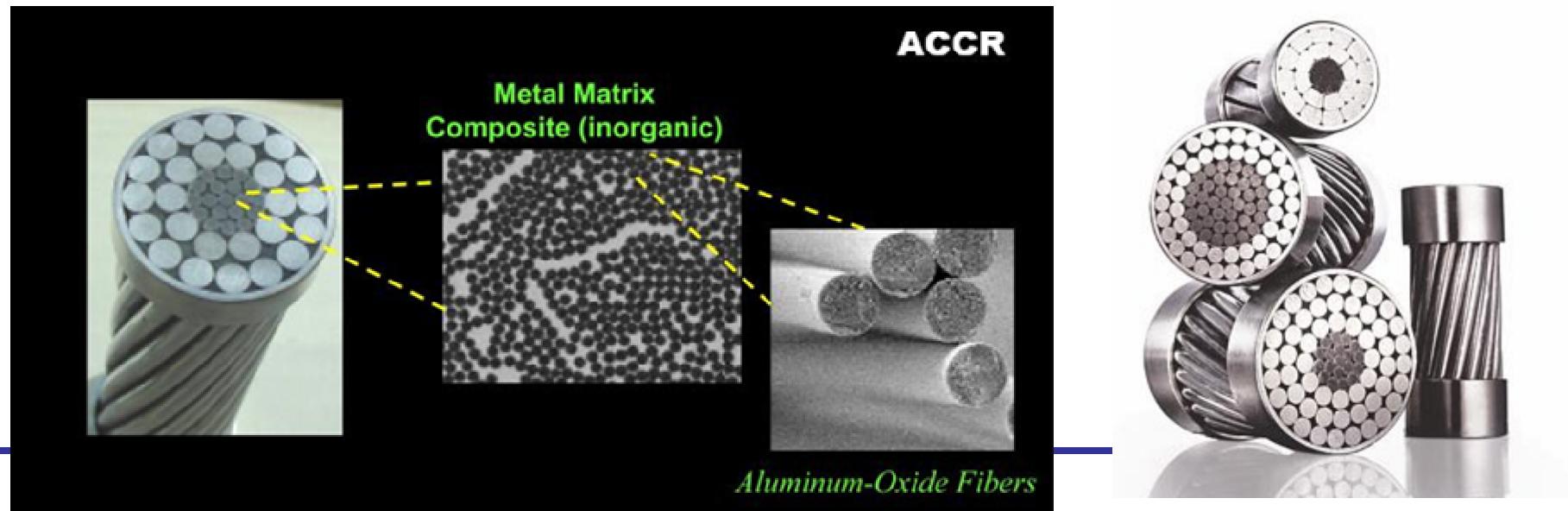
AlFe 4 – mechanicky pevnější



Vodiče pro venkovní vedení

Kompozitní vodiče ACCR (Aluminum Conductor Composite Reinforced)

- jádro je vyrobeno z oxidu hliníku, zpracovaného do podoby mikrovláken, která jsou poté svinuta do jednotlivých pramenů
- vnější plášť lana je z kompozitu Al a Zr (stabilita pláště při vyšších provozních teplotách)
- jádro i plášť tvoří hliník, nedochází ke korozi lana
- pevnost jádra lana je srovnatelná s pevností oceli a je osmkrát vyšší než pevnost Al, jeho hmotnost je však v porovnání s ocelovým jádrem poloviční
- jednoduchá implementace ACCR lana do existujícího vedení
- 2x vyšší přenosová kapacita bez výměny stožárů, jejich vzdáleností a izolátorů
- nižší tepelná roztažnost jádra, tzn. možnost vyšších provozních teplot (až 250 °C)



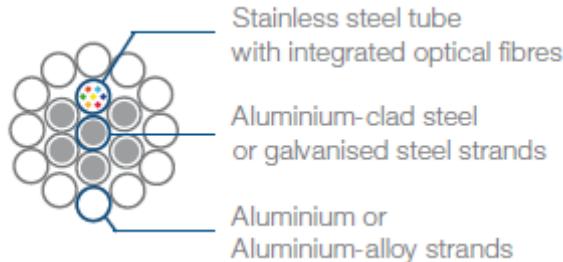
Vodiče pro venkovní vedení

Cenové srovnání

kombinované lano AlFe 185/30	cca 70 Kč/m
adekvátní vodič ACCR	cca 480 Kč/m

Lana OPCC

kombinované lano s možností optického přenosu dat



Vodiče pro venkovní vedení

Svazkové vodiče

- každá fáze tvořena svazkem několika vodičů

dvojsvazek



trojsvazek



čtyřsvazek



- použití pouze na hladinách VVN

Účel použití:- zlepšení mechanických vlastností vedení

- zmenšení ztrát koronou

- vliv na parametry vedení → menší L → menší vlnová impedance → vyšší

hodnota přirozeného vedení → větší přenosová kapacita vedení

Izolované vodiče

- používají se na hladinách VN a NN
- pracovní izolace z PE odolného proti UV záření nebo PVC
- menší vzdálenosti mezi vodiči, menší stožáry, lepší el. Parametry
- menší poruchovost vedení

1-AES



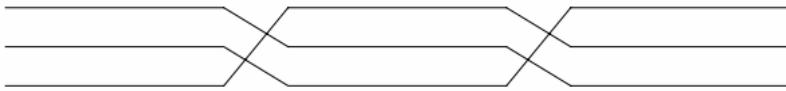
1-AYKYz



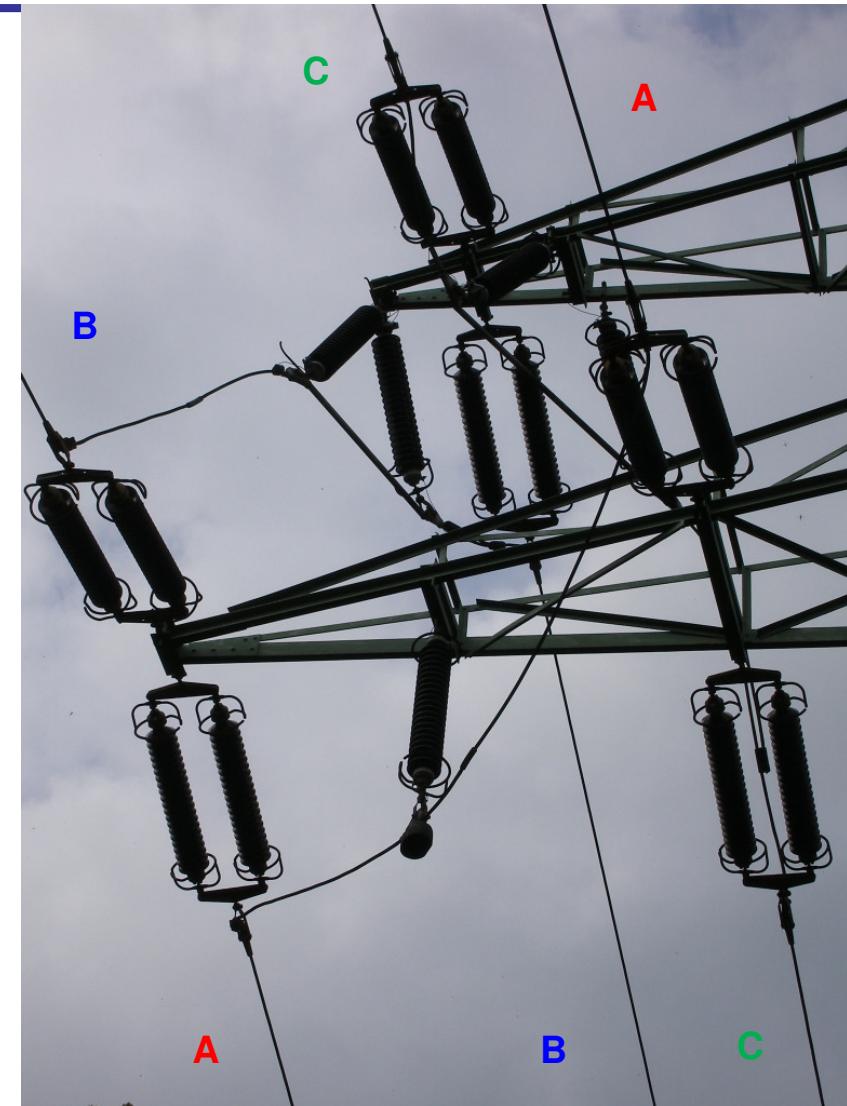
Vodiče pro venkovní vedení

Transpozice vedení:

- prostřídání fázových vodičů vůči zemi



- zajištění rovnoměrnosti parametrů jednotlivých fázových vodičů
- jen u VVN (možnost i u VN, ale nedělá se)
- na 300 km úplné prostřídání fází
- využití speciálních stožárů pro transpozici vodičů



Výzbroj venkovního vedení

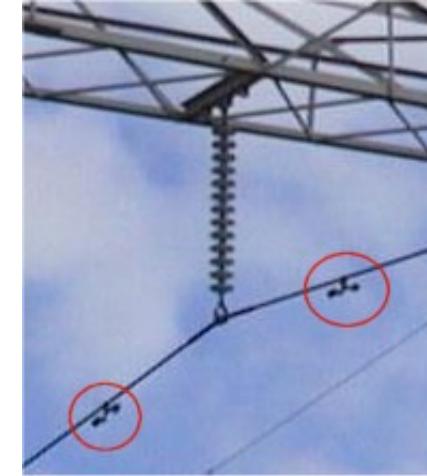
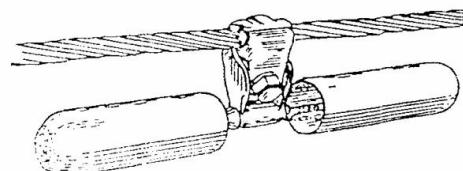
Spojky vodičů:

- šroubové, trubkové vrubové

Rozpěrky svazkových nebo fázových vodičů

Tlumiče vibrací

- do průřezu 120 mm².....3 až 4 kg
- větší průřezy 8 kg



Výstražné koule (bílo-červené) na vodičích

- upozornění pilotů vrtulníků a letadel
- upozornění ptáků – zabránění střetu s vodiči



Zemnicí lana (ZL)

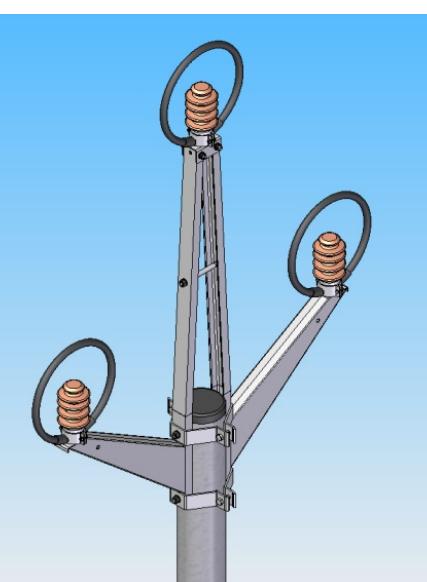
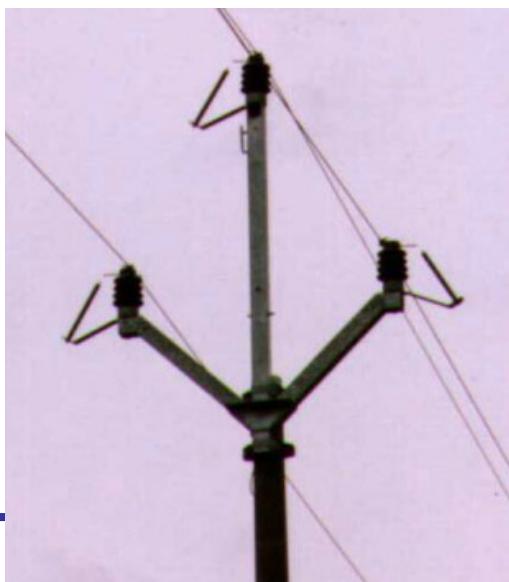
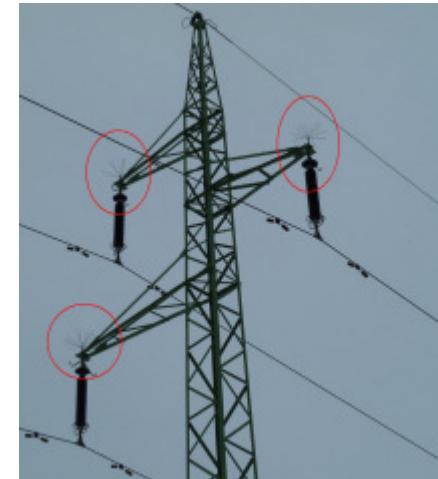
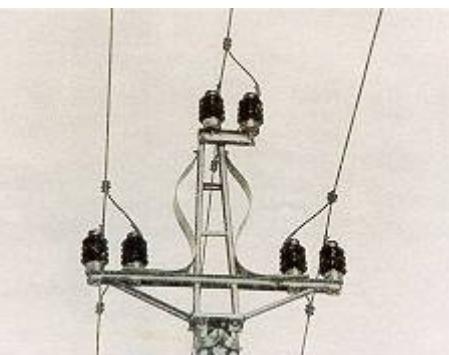
- ochrana proti přímému úderu blesku do vedení
- pevně spojeno se stožárem, který je uzemněn
- ocelová lana, AlFe lana, nebo KZL (kombinovaná se skleněným vláknem pro přenos informací)
- vedení VVN (110 kV - 1 ZL, 220 kV a 400 kV – 2 ZL)
- u VN pouze výběhová lana (cca do 1 km od rozvodny)



Ochrana proti úrazu ptáků

Zabránění střetu ptáků s vodiči - výstražné koule (bílo-červené) na vodičích

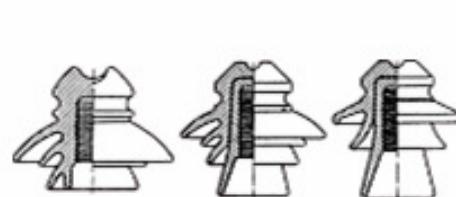
Dosedání ptáků na vedení – zábrany nebo vytvoření bezpečného místa dosedu



Izolátory venkovního vedení

izolátory:

- podpěrné (do 35 kV).
- závěsné (od 22 kV)
- tyčové
- talířové



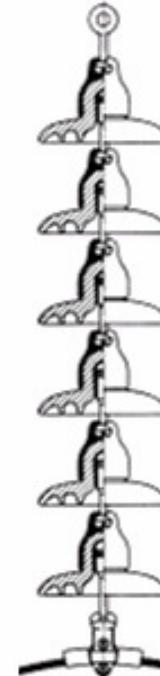
materiál izolátorů: tvrdý porcelán, sklo, plast + sklo, gumové povrchy

uvevnění vodiče:

- vazem
- svorkou



způsob uchycení vodiče

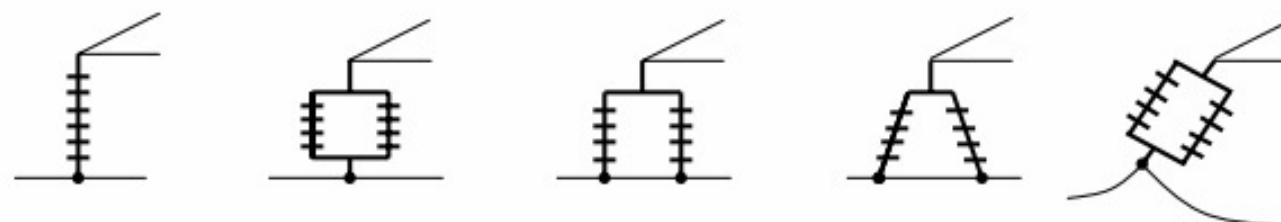


Délky izolátorů:

110 kV – 1,8 m
(7 talířů)

220 kV – 2,5 m
(11-13 talířů)

400 kV – 3,5 m
(22 talířů)



Mlhové izolátory – do oblastí s velkým znečištěním

Izolátory venkovního vedení

Ochranná jiskřiště na izolátorech

- ochrana proti poškození při přeskoku na izolátoru
- přeskok mezi elektrodami jiskřiště → svedení přepětí do země přes uzemněnou konstrukci stožáru → vznik zkratu → automatika OZ

Svodiče přepětí – VN, NN



Kapacitní kruhy

- zrovnoměrnění napěťového spádu podél závěsného izolátoru
- větší spád na části izolátoru blíže k vodiči

Stožáry venkovního vedení

Druhy stožárů podle účelu

Nosné stožáry (N) – mezilehlé stožáry přímé trasy, vodiče jsou zavěšeny pomocí svislých izolátorových závěsů, zatížení vodičů s přídavným zatížením námrazou a větrem

Vzdálenosti stožárů VVN jsou od 300 do 500 m

(300 m je nejčastěji při 110 kV, při vyšších napětích a těžších vodičích bývají vzdálenosti větší).

Výztužné (kotevní) stožáry (V) - pevné body na trase, vodiče jsou ke stožáru připojeny pomocí kotevních izolátorových závěsů namáhaných plným tahem, vodič přechází přes izolátory přeponkou bez mechanického namáhání. Kromě základního zatížení ještě 2/3 jednostranného tahu vodičů a ZL.
rozestup výztužných stožárů po trase: cca 3 km jednoduchý vodič, až 5 km svazkový vodič

Rohové stožáry (R) - v lomech trasy, mohou být jako nosné nebo zároveň výztužné. Rohové stožáry přenášejí výslednici tahů ve vodičích včetně námrazy.

Koncové (K) – na konci trasy, snesou tah všech vodičů

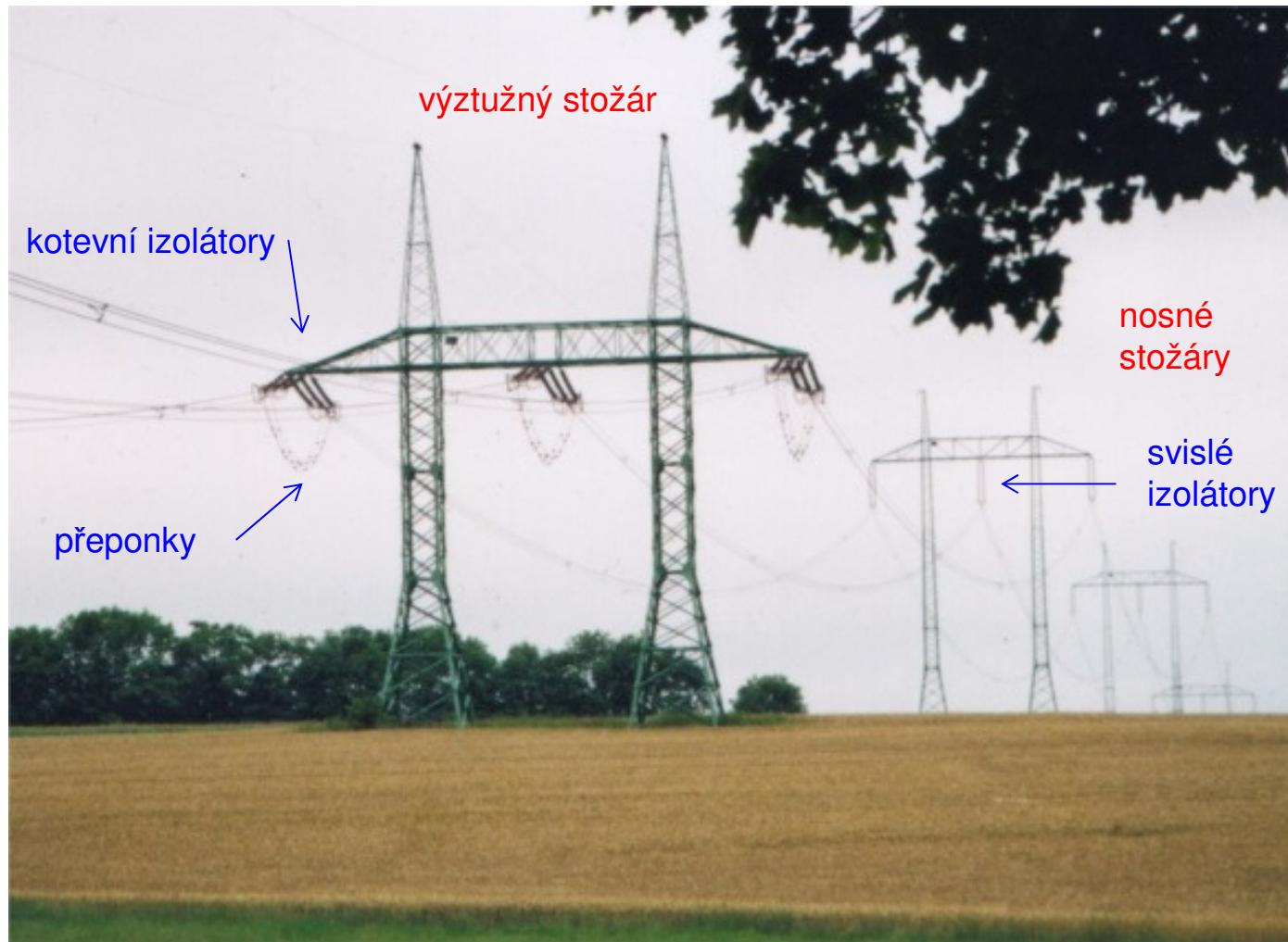
Dále rozeznáváme stožáry odbočné, rozvodné, křižovatkové (při křižování vedení se železnicí, vodní překážkou nebo s jiným vedením libovolného napětí).

U velkých vodních překážek vzniká potřeba speciálních stožárů.

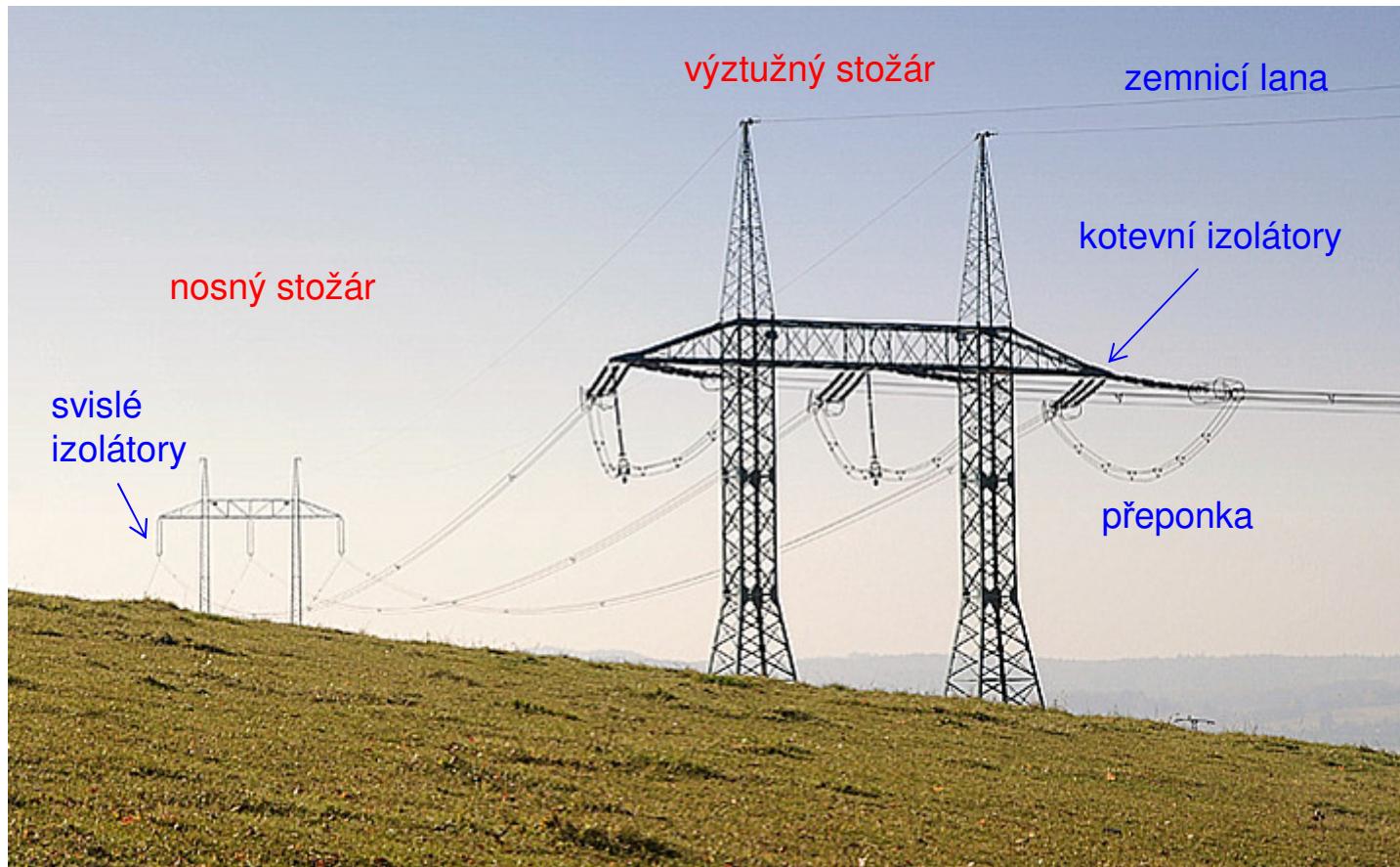
Největší rozpětí stožárů na světě

5374 m překlenutí fjordu Ameralik v Grónsku, vedení 132 kV (výstavba 1993)

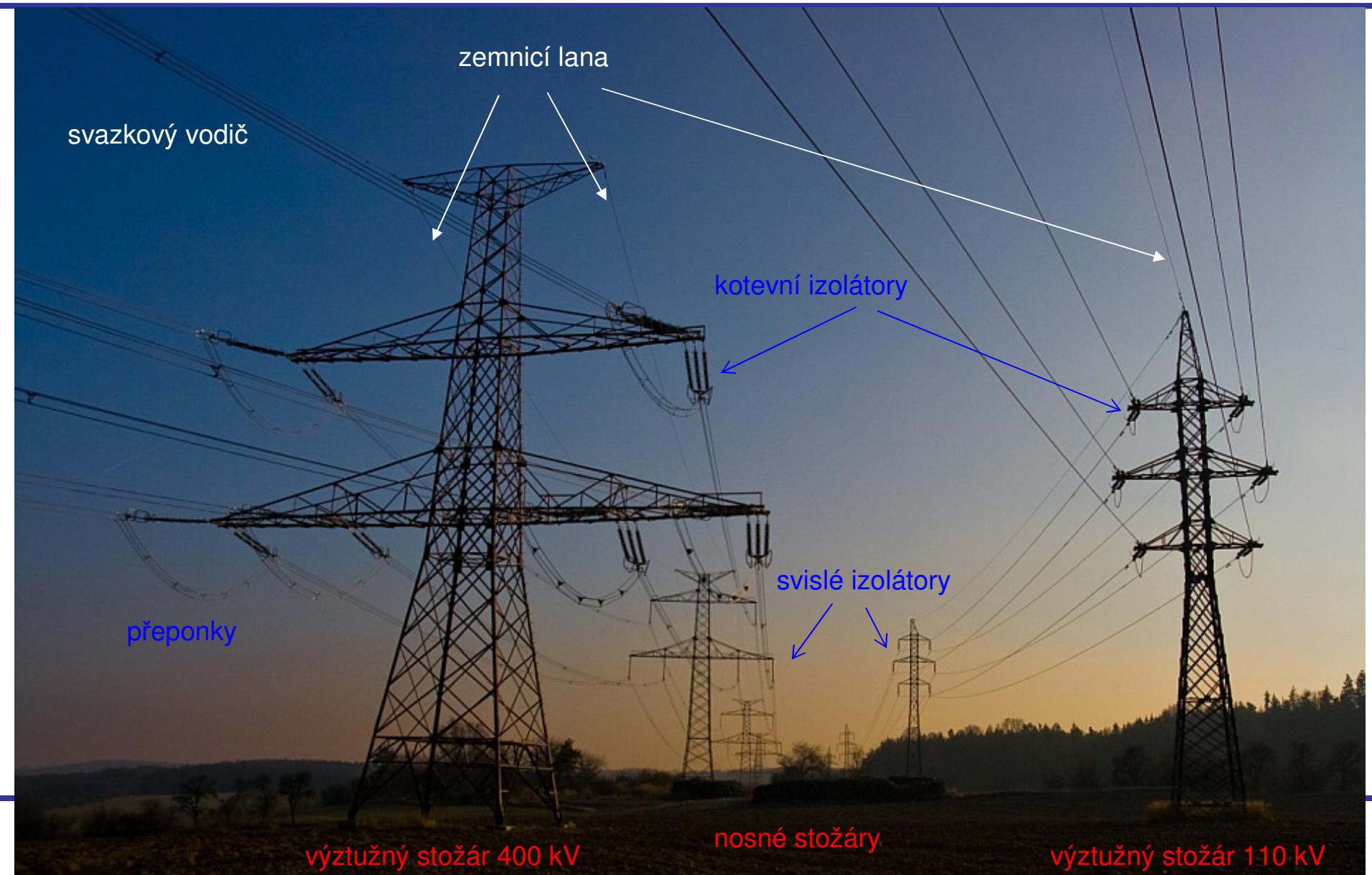
Stožáry venkovního vedení



Stožáry venkovního vedení



Stožáry venkovního vedení



Stožáry venkovního vedení

Druhy stožárů podle konstrukce a materiálu

Materiál: ocel, beton, železobeton, dřevo

Dřevěné stožáry

typy:

- | | |
|--|----|
| - jednoduchý (J) | I |
| - složené:
dvojsloup (D) | II |
| kozlík
(úzký U, štíhlý Š, široký A) | Λ |
| typ H | H |

Do země 1/6 až 1/5 délky stožáru

Ochrana proti hnilibě:

Impregnace dřeva - dehetový olej, roztok thiosíranu vápenatého

Betonové patky



Betonové stožáry

- jednodílkové, na horním konci ocelová konzola (rovinné uspořádání vodičů, trojúhelníkové, Pařát)
 - použití: NN a VN vedení
-

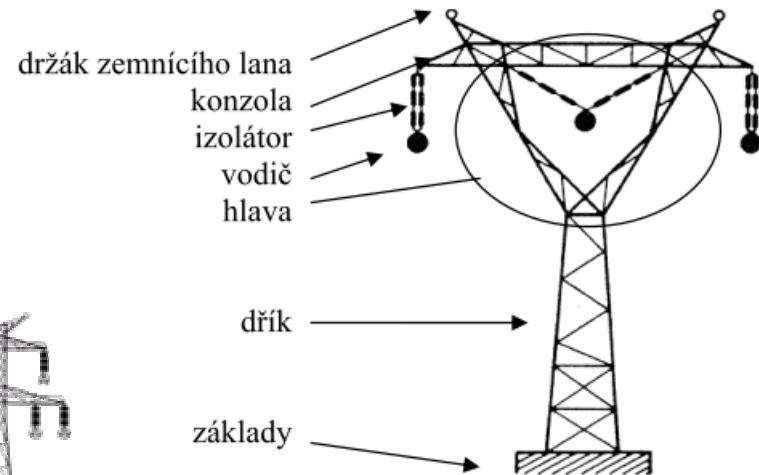
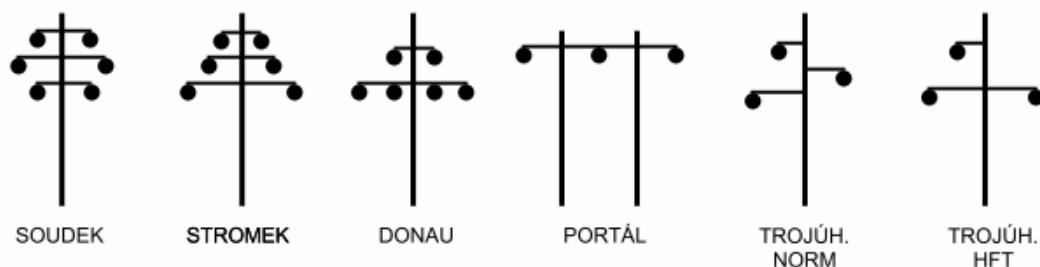
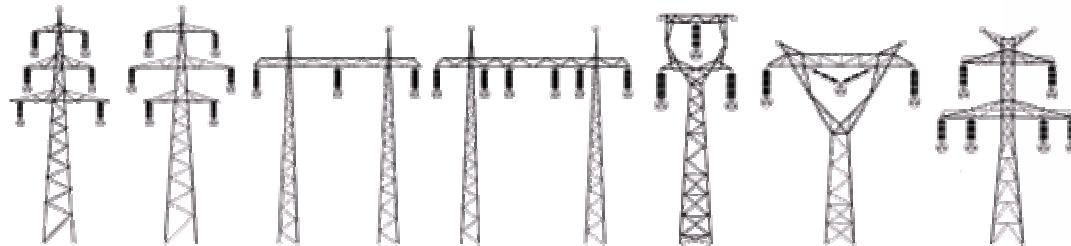
Stožáry venkovního vedení

Ocelové stožáry

Konstrukce – příhradové, trubkové, hraněné (tubusové)

Ochrana proti korozi:

- nátěr barvou, pozinkování, atmofix (speciální ocel)



Výšky stožárů VVN
- 20 až 40 m podle typu
stožáru, jeho určení a
nerovnosti terénu

Návrh venkovního vedení

Klimatické podmínky

Maximální a minimální teplota

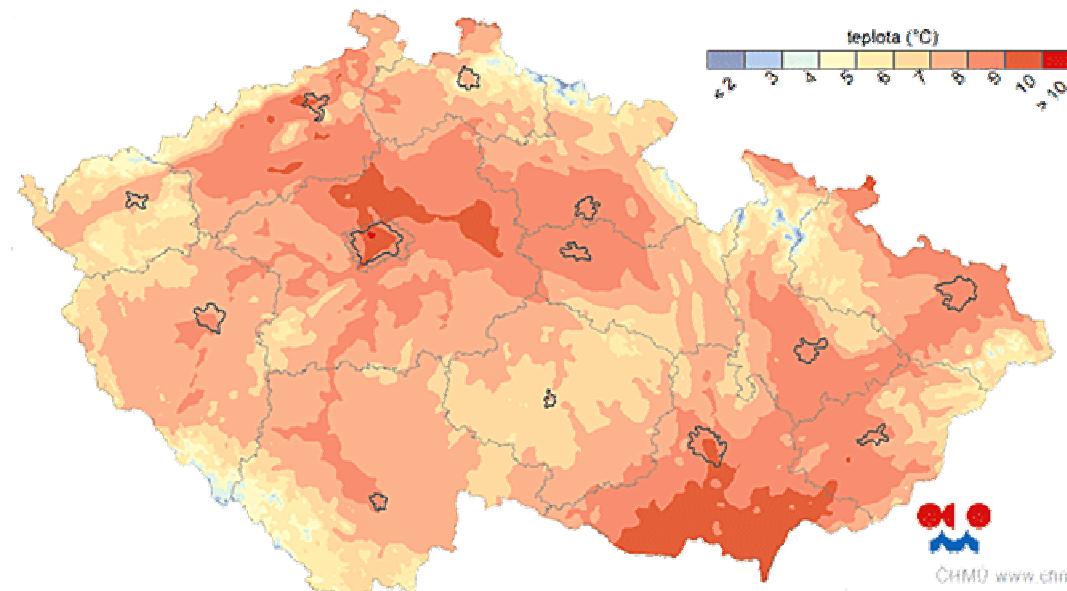
Teplota vzduchu: - 30 °C až + 40 °C

Oteplení vodiče procházejícím proudem, případně i slunečním zářením (při výpočtech se neuvažuje)

Maximální teplota : kontrola maximálního průhybu vodiče a předepsané vzdálenosti od terénu

Minimální teplota: maximální zkrácení vodičů, silové namáhání izolátorů

Průměrná roční teplota
(1961-2000)



Návrh venkovního vedení

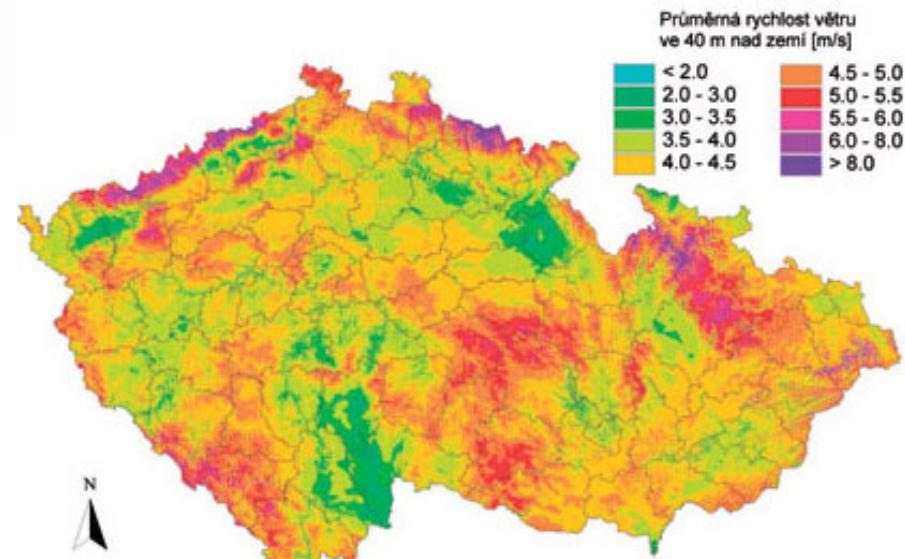
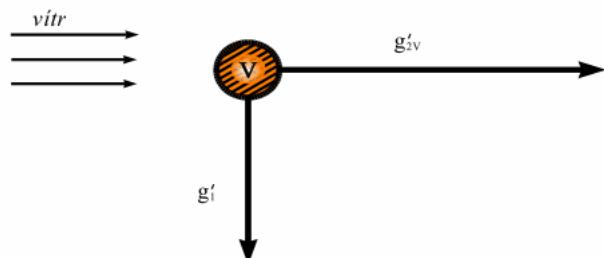
Klimatické podmínky

Vítr

- přídavné zatížení vodičů i nosné konstrukce
- vychylování vodičů ze svislé polohy a kmitání vodičů (tlumiče vibrací)

rychlosť větru

při zemi	10m	15m	20m	25m	30m	100m
1,0	1,37	1,47	1,56	1,62	1,67	2,04

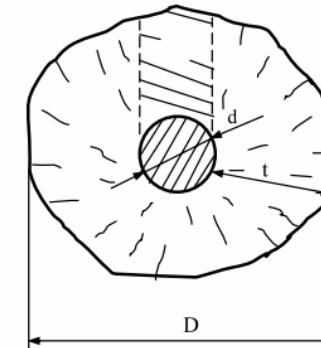


Návrh venkovního vedení

Klimatické podmínky

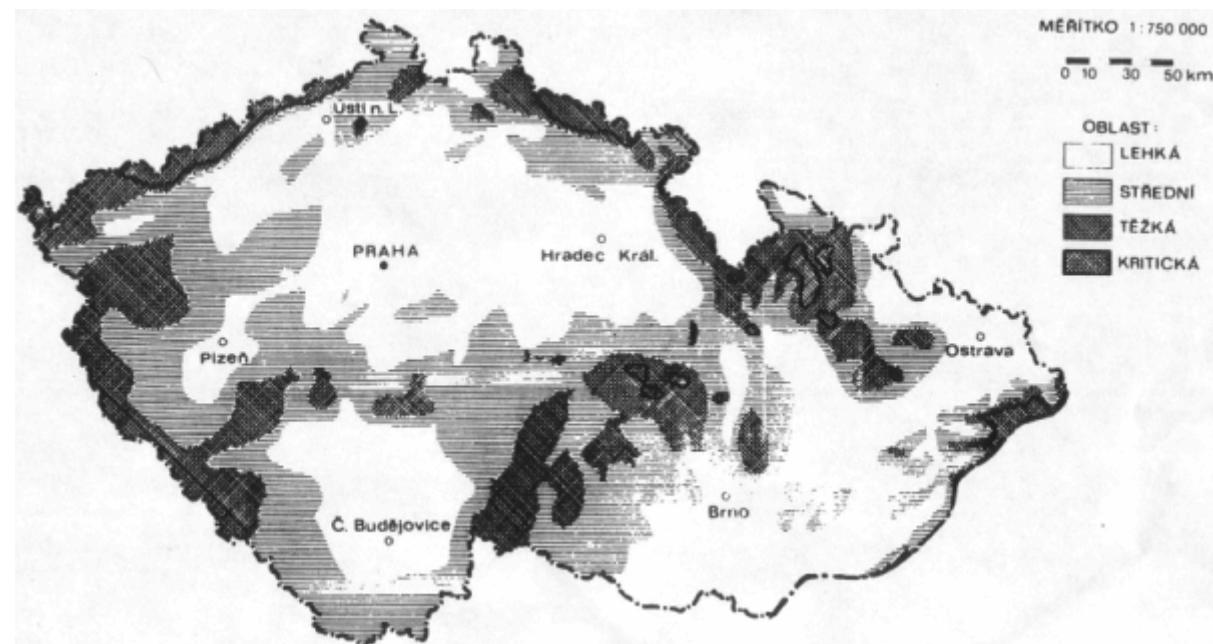
Námraza

- přídavné zatížení vodičů i nosné konstrukce vedení
- velikost námrazy závisí na klimatických podmínkách
- (ve světě 8 až 80 kg na 1 metr vodiče, v ČR 1 až přes 3 kg/m)



Likvidace námrazku

- samovolně
- sklepáváním izolačními tyčemi
- vyhříváním vodiče zvýšeným proudem

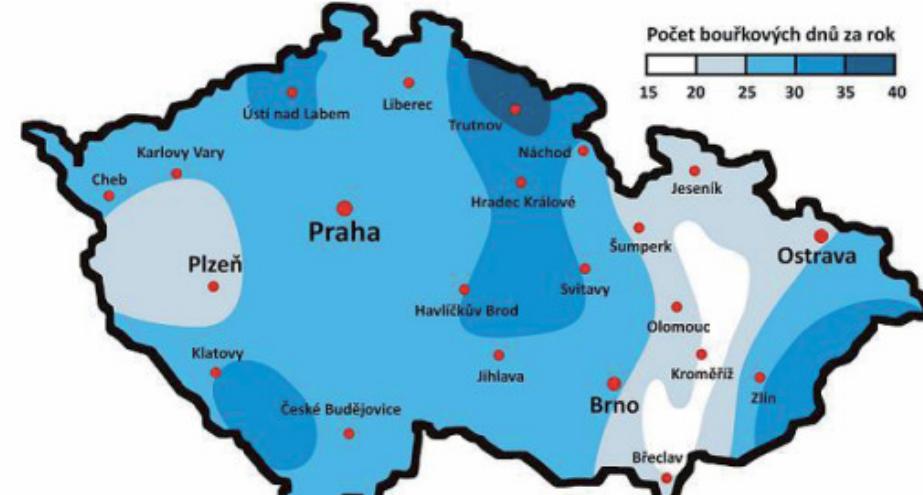


Návrh venkovního vedení

Klimatické podmínky

Bouřky

- přímé údery blesku do vedení (ochrana zemnicími lany, dostatečná izolace a malý odpor uzemnění stožárů)
- nepřímé údery do vedení (dostatečná izolace, svodiče přepětí)
- v ČR průměrně 30 úderů blesku do vedení za rok na 100 km délky vedení
- v ČR cca 30 bouřkových dnů za rok
- (ve světě až 0,5 až 240 dnů za rok)



Izokeraunická mapa ČR

Návrh venkovního vedení

Při teplotních změnách, zatížení námrazou a větrem se v porovnání s montážním stavem mění poloha vodičů proti zemi a stožáru.

Pro výpočet průhybu a namáhání vodičů se uvažují tyto případy počasí (ta určují největší dovolená namáhání):

- 5 °C, bezvětrí s normálním námrazkem příslušné oblasti
(AlFe lana delší než 50 m - kontrola na zvětšený námrazek,
při kterém nesmí namáhání přesáhnout 85% měrné pevnosti)
- 5 °C a vítr na neomrzlý vodič
- +40 °C, bezvětrí
- 30 °C, bez námrazku a bezvětrí
- 5 °C, vítr na omrzlý vodič

Montážní tabulky venkovního vedení

- závislost tahu, jakým se napíná vodič, na okolní teplotě
- zajištění dovoleného průhybu a mechanického namáhání vodiče při max. a min. teplotě okolí

Velké stožáry se postupně montují na místě, menší stožáry se vztyčují již smontované (jeřáb)



Návrh venkovního vedení

Montážní tabulky

Parametry podle normy: ČSN EN 50 423

Výchozí vodorovná složka namáhání [MPa]:

38

Výchozí teplota vodiče [°C]:

-5.00

Námrazek ve výchozím stavu:

NE

Námrazová oblast:

N1

Přetížení námrazkem:

4.743

Převýšení záv. bodů [m]:

0.00

Výška nad zemí:

do 20 m

Úroveň spolehlivosti:

1 (50 let)

Redukční souč. námrazy 0,3:

NE

Parametry vodiče: 42/7 AlFe

E [MPa]: 80000

alfa [1/°C]: 0.0000187

d [mm]: 9.0

S [mm²]: 49.48

gama [N/m.mm²]: 0.0347

mv [kg/m]: 0.1716

sigma dov. [MPa]: 198.20

Namáhání vodiče [MPa]

Rozp./Tepl.	-30	-20	-10	-5	0	10	20	30	40	-5 + N
10.0	75.19	60.27	45.40	38.00	30.67	16.72	7.49	4.57	3.48	42.68
15.0	74.94	60.06	45.29	38.00	30.84	17.79	9.66	6.49	5.08	46.69
20.0	74.58	59.78	45.16	38.00	31.07	18.93	11.54	8.23	6.59	50.85
25.0	74.12	59.41	44.98	38.00	31.34	20.06	13.22	9.84	8.01	54.95
30.0	73.57	58.98	44.78	38.00	31.63	21.14	14.74	11.32	9.37	58.91
35.0	72.92	58.47	44.55	38.00	31.94	22.16	16.12	12.70	10.65	62.72
40.0	72.19	57.91	44.30	38.00	32.25	23.12	17.39	13.99	11.86	66.36
45.0	71.37	57.29	44.04	38.00	32.56	24.02	18.56	15.20	13.02	69.85
50.0	70.47	56.62	43.77	38.00	32.86	24.85	19.65	16.33	14.11	73.19
55.0	69.51	55.92	43.49	38.00	33.16	25.63	20.65	17.39	15.15	76.39
60.0	68.48	55.18	43.21	38.00	33.44	26.36	21.59	18.38	16.14	79.47
65.0	67.39	54.42	42.94	38.00	33.70	27.03	22.46	19.32	17.08	82.42
70.0	66.26	53.65	42.66	38.00	33.96	27.66	23.28	20.20	17.97	85.25

Havárie venkovních vedení



Obr.1 „Klasicky“ rozložený dřevěný, patkovaný stožár



Obr.2 Zlomený betonový sloup, celkový pohled

Vichřice Emma 2008

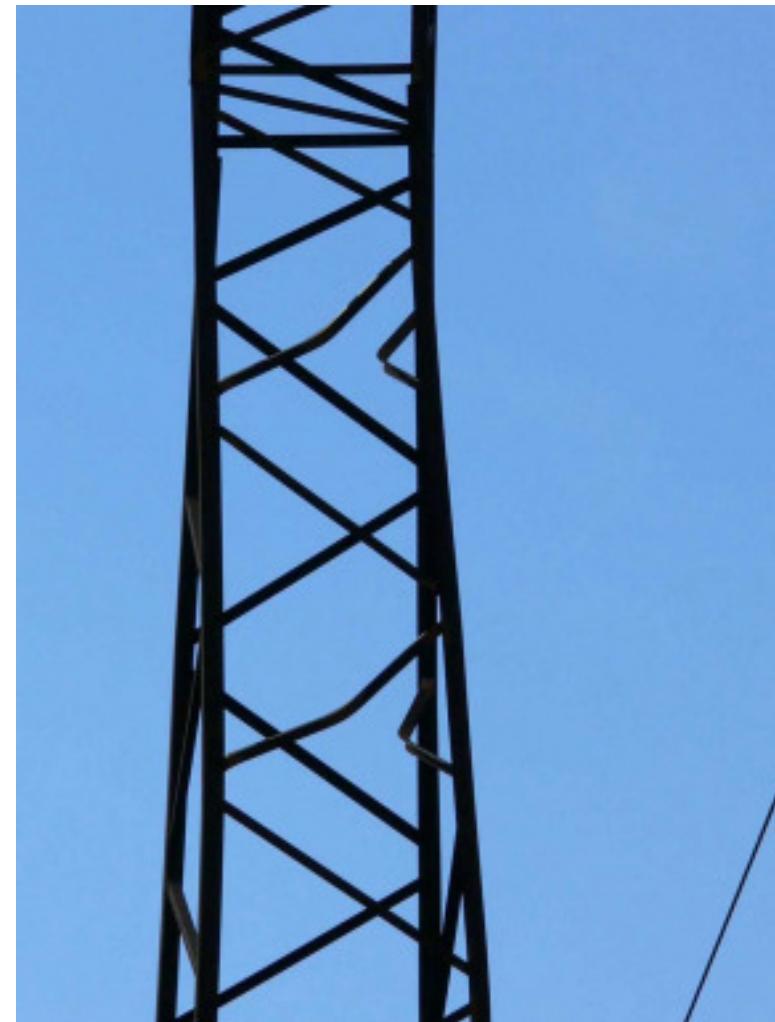
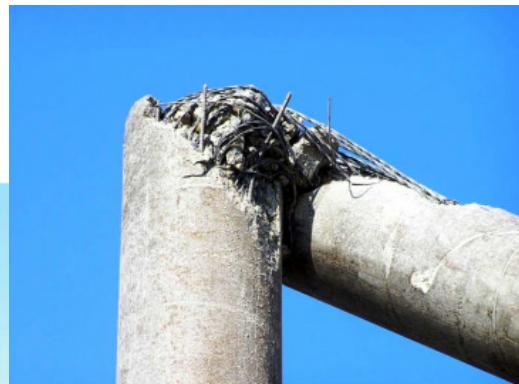


Havárie venkovních vedení



Obr.4 Havárie dvojitého vedení 22 kV, celkový pohled

Vichřice Emma 2008



Havárie venkovních vedení



Kalamita Kyril 2004

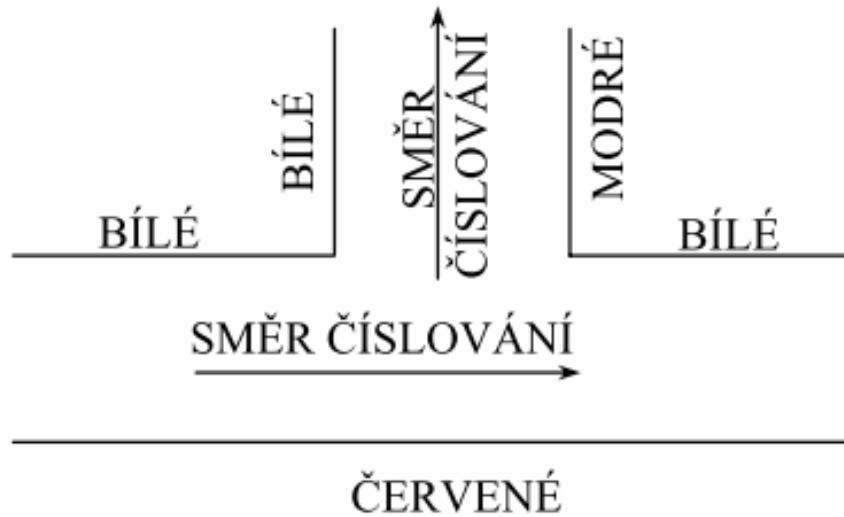


Značení venkovního vedení

Značení vedení

zpravidla:

- po levé straně liché číslo (vedení se číslují, např. 637, 638) a bílá barva.
- po pravé straně sudé číslo a červená barva.
- odbočky jinak (např. modrou barvou)
- značení barvou asi 2 m od země a u vedení vvn a zvn i pod konzolou
- číslování se provádí zpravidla ve směru toku energie



Kabelová vedení

Kabelová vedení

- zejména městské a průmyslové sítě NN a VN, výjimečně kabely VVN

Charakteristika kabelového vedení:

- izolované vodiče jedno– či vícežilové a další výzbroj (kabelové koncovky, průchody, spojky)
 - induktivní reaktance X_L (L) je nižší než u venkovního vedení
 - kapacitní susceptance B (C) je vyšší než u venkovního vedení (cca 30 x)
 - úbytek napětí ΔU a jalové ztráty ΔQ jsou nižší vlivem nižší reaktance
 - méně poruchové, poruchy většinou trvalého charakteru
 - větší podíl vícefázových poruch – jednofázové přechází na vícefázové
 - dražší výstavba u sítí VN a VVN
 - estetická stránka – kabelizace preferována v bytové zástavbě
 - menší prostorová náročnost

Kabelová vedení



Kabely

Materiál jader silových kabelů

Materiál: Cu nebo Al

Při stejném odporu:

- průřez vodiče Al o 64% větší než vodiče Cu
- hmotnost vodiče Al je cca 50% hmotnosti Cu vodiče
- pevnost v tahu je u Al vodičů průměrně 70% pevnosti Cu vodičů

Hliníkové vodiče mají některé nepříznivé vlastnosti:

Povrchová vrstva oxidu zvyšuje přechodový odpor v místě spojů – řádné očištění spojů

a) Ve spojích vodičů Cu s Al vystavených vlhkmu dochází k elektrolytickému rozkladu

- ocelové pozinkované svorky
- podložky z plátovaného plechu Cu - Al mezi oba kovy + kontaktní tuk
- c) Pevnost hliníku je menší, lehce se deformuje, vytahuje a láme → zabránit vícenásobným ohybům a tvoření smyček, naříznutí vodiče při odizolování (hrozí ulomení)
- d) Teplotní roztažnost Al je větší, než Cu a Fe. Následkem střídavého ohřívání se uvolňuje tlak ve svorkách. Tomu přispívá i tzv. tečení za studena, při kterém se vodič deformuje působením kontaktního tlaku → dotahování šroubových spojů, použití pérových podložek.



Kabely

Konstrukce jader silových kabelů

Jádra vodičů mohou být zhotovena dvojím způsobem:

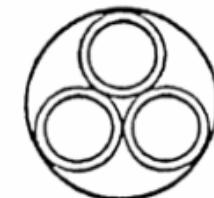
- **plná** jsou tvořena jediným vodičem.
- **složená** jsou tvořena lanem, tedy větším počtem slaněných drátů → větší pružnost

Podle profilu lze rozlišovat provedení jader:

- **kruhová** – jednožilové vodiče a kabely, vícežilové kabely menších průřezů
- **sektorová** – třížilové a čtyřžilové kabely větších průřezů - lepší využití prostoru, menší průměr než vodič s kruhovými jádry stejného průřezu → nižší spotřeba materiálu na pláště, ale i na výplň dutin mezi žílami.
- **jiné profily jader**, např. oválná jádra kabelů vvn , ale tyto případy jsou výjimečné.

Podle počtu žil

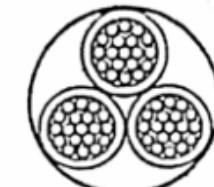
- jednožilové – především kabely vn a vvn
- vícežilové – především kabely nn



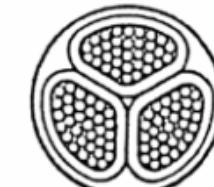
re = plný kruhový vodič



se = plný sektorový vodič



rm = lanový kruhový vodič



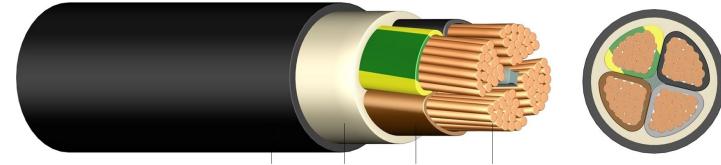
sm = lanový sektorový vodič

Kabely

Izolace kabelů

PVC – kabely nn a vn (70 °C) CYKY.., AYKY...

- plamen nešířící materiál, ale při hoření se uvolňuje chlorovodík



XE – kabely vn a vvn (90 °C) AXEXCY...

- vyšší mechanická a tepelná odolnost, vyšší el. pevnost
- nižší dielektrické ztráty, malé nabíjecí proudy
- hořlavý oproti PVC



Pryž – pro pohyblivé uložení

Silikonová pryž – vysoká ohebnost, tepelná odolnost od -55 °C až do 180 °C

Papír impregnovaný minerálním olejem – dnes již zastaralá technologie

Speciální izolace – bezhalogenové, nehořlavé

Nároky na kabel ovlivňují konstrukci a materiál izolace i pláště kabelu

- ohebnost kabelu
- chemická a tepelná odolnost
- odolnost proti pronikání vlhkosti a vodě
- netoxické zplodiny při hoření, zachování funkčnosti kabelu i při požáru

Kabely pro různé použití

Kabely pro pevné uložení – jádro plné nebo složené z malého počtu vodičů → málo ohebné
vkládají se do trubek, lišt, na podpěry, do zdi, betonu, země atd.

Kabely pro pohyblivé uložení – jádro složené z většího počtu tenkých drátů → více ohebné → šňůry (lehké – domácí spotřebiče, těžké – průmyslové rozvody, větší mechanické namáhání)

Kabely závěsné nebo samonosné

- síť nn, vn vyjímečně



Bezhalogenové ohniodolné kabely

1 kg PVC může uvolnit 180 litrů HCl → nebezpečí nejen pro lidi, ale i pro konstrukční části budov (korozivní účinky)

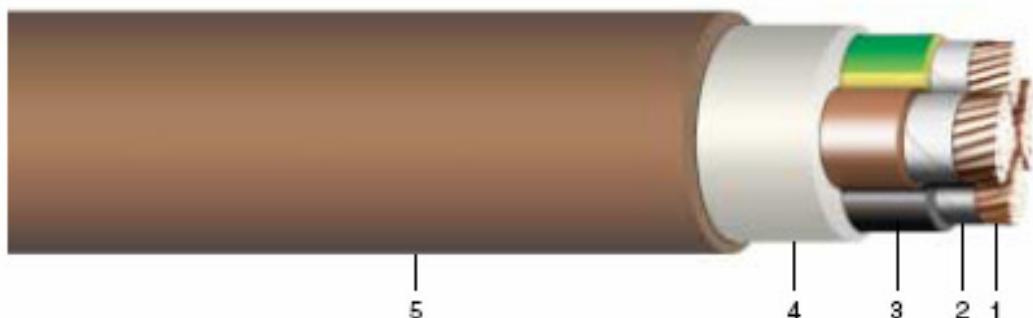
=> bezhalogenní ohnivzdorné kabely (izolace na bázi kopolymerů polyolefinu nebo silikonu)

- snížení šíření plamene po kabelu
- výplň a obal HFFR (Halogen-Free Fire-Resistant)
- pro použití na hořlavých podkladech a do prostředí s nebezpečím požáru
- vhodné do míst s velkou koncentrací lidí - metra. letiště, nemocnice aj.

Kabely pro různé použití

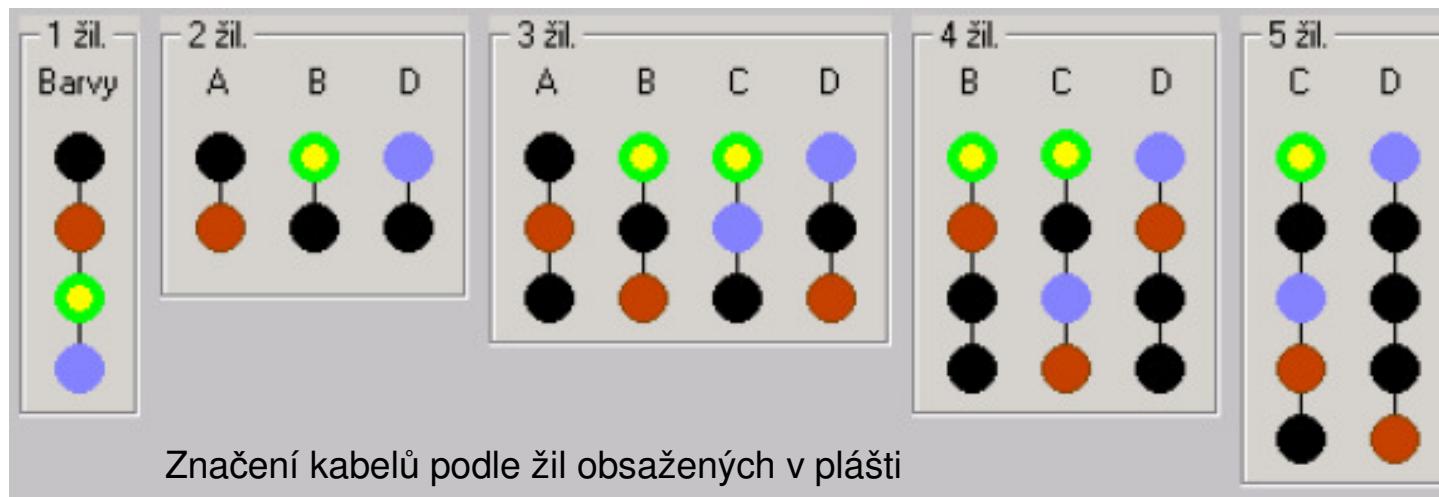
Kabely se zachováním funkčnosti i při požáru

- izolace z materiálu, který při vysoké teplotě keramizuje (silikonový kaučuk)
- křemičitý popel v případě požáru je izolant (na rozdíl od ostatních polymerů, které působením vyšších teplot uhelnatí a tím se stávají vodivými).
- nebo přídavná vrstva izolace ze sklo-slídových pásků
- vhodné zejména pro použití na hořlavých podkladech a do prostředí s nebezpečím požáru či výbuchu, kde se vyžaduje funkční schopnost při požáru, např. jaderné elektrárny



- 1 - vodič
- 2 – sklo-slídové pásky
- 3 – keramizující izolace
- 4 – HFFR výplň
- 5 – HFFR plášt'

Značení kabelů



Existují různé způsoby značení kabelů – podle výrobců, států

V ČR se používá tzv. neharmonizované značení cca od 70.let
- označení jednotlivých vrstev kabelu směrem od středu k plášti

Značení kabelů

0	-	1	2	3	4			5	(6)	x	7
---	---	---	---	---	---	--	--	---	-----	---	---

0 jmenovité napětí v kV, např. 1, 6, 22, 110

1 materiál jádra Cu.....C Cu vodotěsné.....CV
Al.....A Al vodotěsné.....AV

2 materiál izolace kaučuk (guma) G
PVC Y
zesítěný PE XE
papír N

3 rozlišení jednotlivých typů vodičů důlní D
vlečný V
svařovací Z
silový kabel K

4 další vrstvy – stínění, materiál pláště, ochrana pláště
kovové stínění Cu C ochrana proti pronikání vody nebo vlhkosti V
pancíř P PVC Y
olověný pláště O PE E

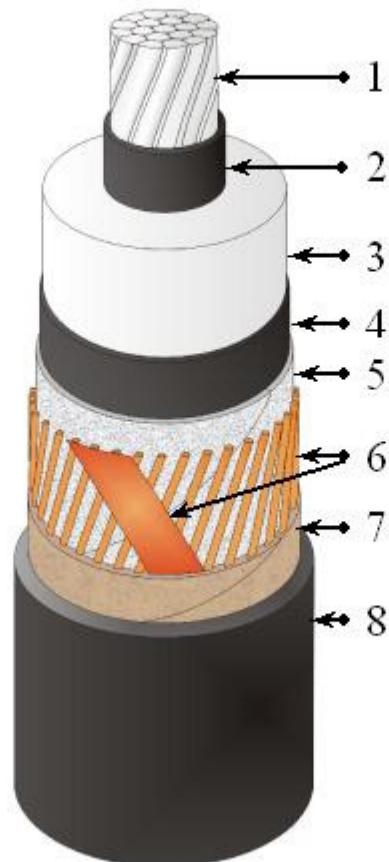
5 (6) počet žil vodiče, eventuálně barvy žil

7 jmenovitý průřez jader

Značení kabelů

Kabel 35-AXEKVCE 1x120/16 20/35kV

1. Hliníkové jádro, kulaté, stočené, zhuštěné
2. Vytlačené polovodičí stínění
3. Izolace XLPE (suché síťování)
4. Vytlačené polovodiči stínění spojené s izolací
5. Polovodiči pásek zadržující vodu
6. Kovové stínění z měděných drátů a měděné pásky
7. Páska zadržující vodu
8. Povlak z PE (černá barva)



← Obrázek je pouze informativní
nezachovává měřítko

POUŽITÍ

- K ukládání do země
- K ukládání do propustí
- K ukládání ve vzduchu

NEJVYŠŠÍ PŘÍPUSTNÁ TEPLOTA VODIČE

- | | |
|---|--------|
| <input type="checkbox"/> Při trvalé práci | 90 °C |
| <input type="checkbox"/> Při přetíženích | 130 °C |
| <input type="checkbox"/> Během zkratu | 250 °C |
- (za předpokladu doby zkratu až 5 sekund)

Teplota ukládání do -20 °C

Spojky a koncovky silových kabelů

Součásti tzv. kabelových souborů nabízených výrobci kabelů

Koncovky:

- pro vnitřní použití
- pro venkovní použití (stříšky proti souvislé vrstvě vody)



Konektory:



Spojky:

- přímé, odbočné, opravné spojky

Podle technologie

- teplem smrštětelné nebo smrštětelné za studena (snadnější manipulace)
-

Spojky a koncovky silových kabelů

Teplem smrštitelné kabelové spojky



Spojky a koncovky silových kabelů

Kabelové spojky smrštěitelné za studena



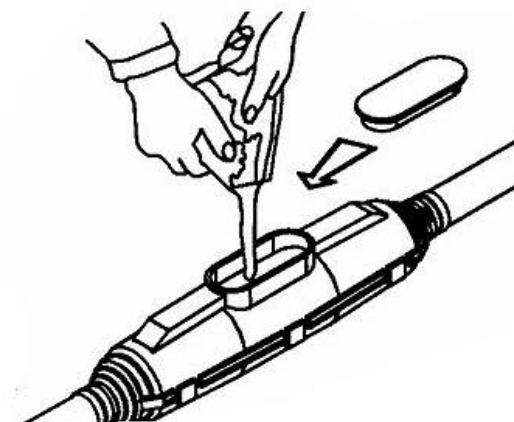
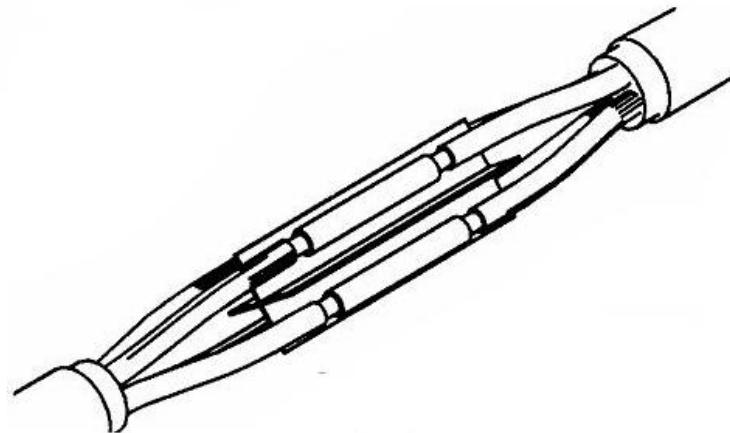
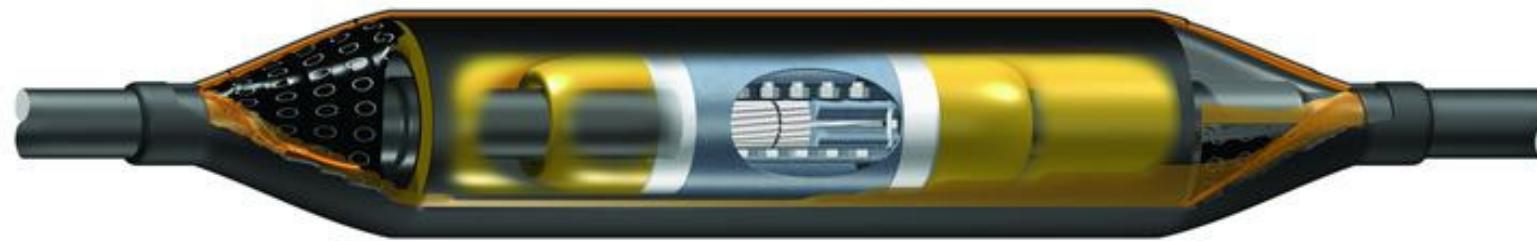
Nasazení vnitřní trubice

Vytažení spirály

Smrštění vnější ochranné trubice

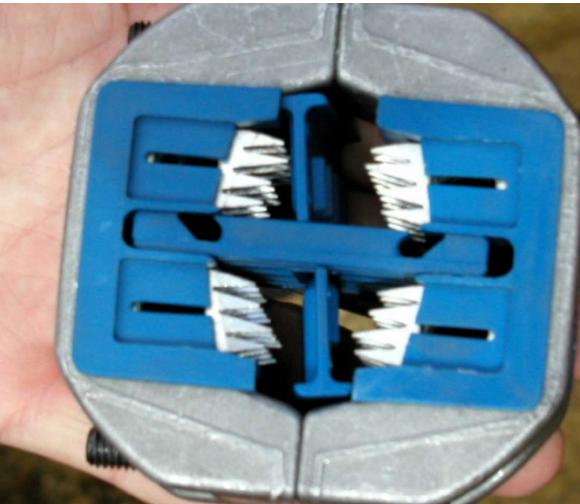
Spojky a koncovky silových kabelů

Kabelové spojky zalévací



Spojky a koncovky silových kabelů

Kabelové spojky zalévací odbočné



Spojky a koncovky silových kabelů

Kabelové spojky páskové

Po spojení jádra kabelu se na něj navine izolační páska.

Na tuto pásku přijde navinout další pásek z PVC, která zabraňuje protlačení jednotlivých žil.

Poslední vrstvou je vrstva z plášťové pásky.



Uložení silových kabelů

Silové kabely mohou být uloženy:

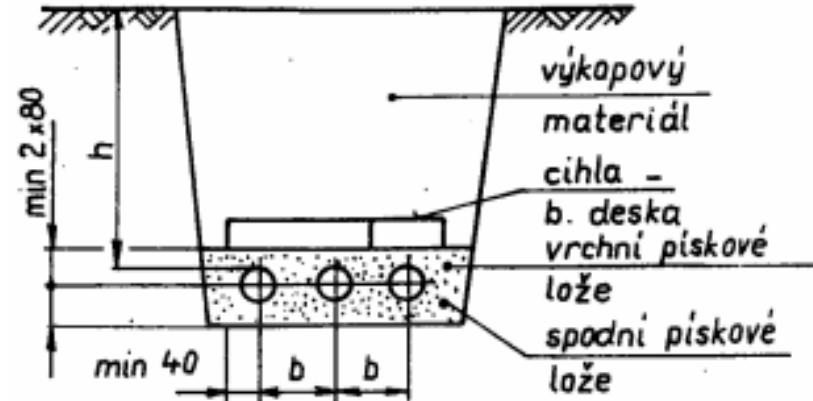
- v zemi ve výkopu
- v kabelových kanálech, mostech, šachtách
- na rovném podkladě – stěně, konstrukci, lávce
- na nosném laně
- **v kolektorech** (společně s dalšími produktovody)



Uložení silových kabelů

Ukládání kabelů do země:

napětí (kV)	hloubka uložení (cm)		
	terén	chodník	vozovka
1	35 (70)	35	100
do 10	70	50	100
do 35	100	100	100
110	130	130	130



Kde nehrází mech. poškození: místo cihel pouze barevná výstražná fólie

Nebezpečí mech. poškození (křížení tras, přechody přes komunikace:
betonová korýtkta nebo trubky (dnes často plastové – tzn. chráničky)



Uložení silových kabelů

Ukládání kabelů do země:



Kabel
+ zemnicí vodič

Uložení silových kabelů

Ukládání kabelů do země:

- manuální výkopové práce
- s použitím techniky
- strojová pokladka, tzv. pluhovacím strojem



Uložení silových kabelů

Kabelové kanály, mosty, šachty

- kabelové kanály shora přístupné, průchozí nebo průlezné
- kabely uložené na výložnících nebo lávkách nástenných nebo závěsných
- zajištění větrání kanálů
- konstrukce kabelového kanálu z nehořlavých materiálů

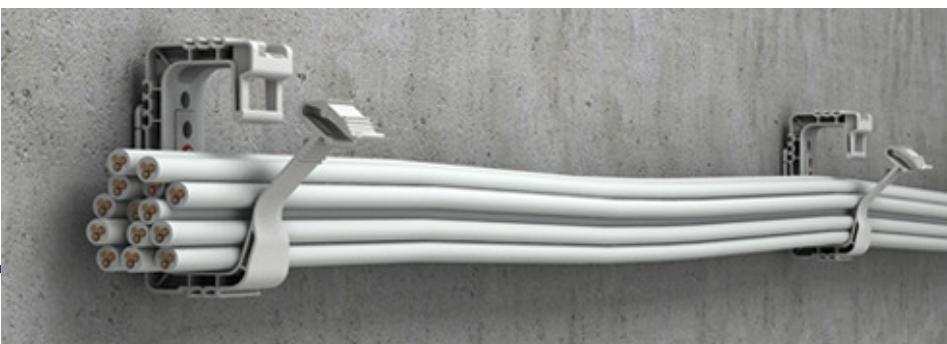
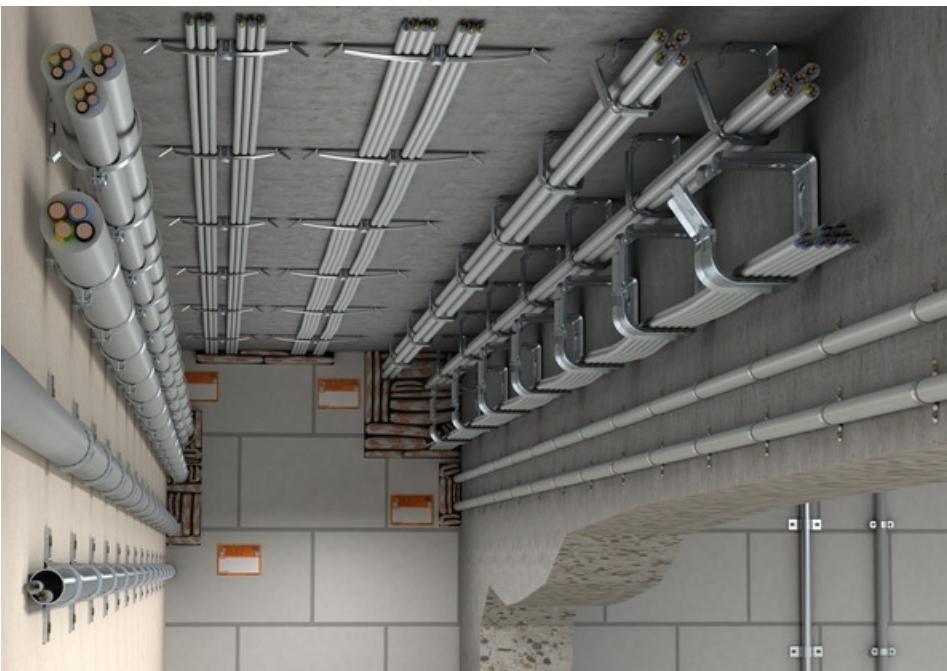


kabelový kanál průchozí Zličín



Uložení silových kabelů

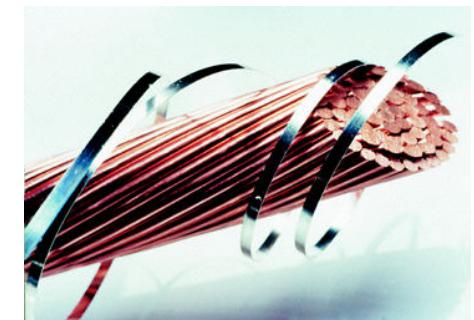
Kabelové rošty, lávky, uložení na stěnách



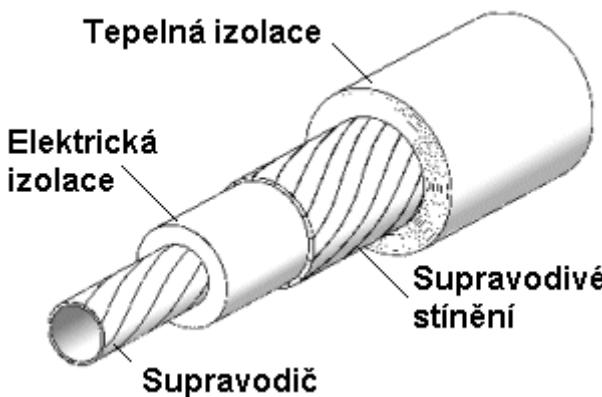
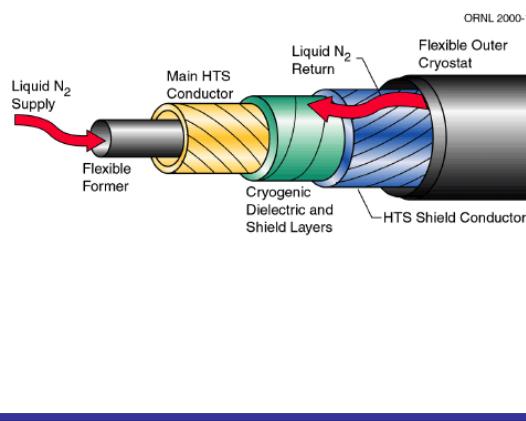
Trendy – supravodivé kabely

HTS (High Temperature Superconducting) kabely

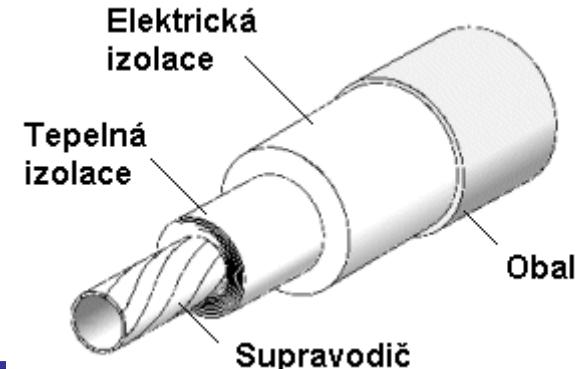
- vodič – křehký keramický materiál
- materiál 1. generace: vodiče BSCCO (BiSrCaCuO)
 - kritická teplota $T_c \approx 110\text{K}$, kritická proudové hustota 1 až $5 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$
- materiál 2. generace: vodiče YBCO ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$) - kritická teplota $T_c \approx 70\text{K}$
 - kritická teplota $T_c \approx 70\text{K}$, kritická proudové hustota řádově 10^6 A/cm^2
- vodič tloušťky několik desetin mm, supravodivá vrstva o tloušťce 1 či více μm nanášena na ohebný pásek
- průřez HTS vodiče může být až 100 x menší než u konvenčního vodiče
- chladicí médium – tekutý dusík (bod varu 77 K) (až 4x méně energeticky náročné než He)
- většinou jednožilové kabely, délka cca 100 až 200 m
- první HTS kabel – květen 2001 Kodaň, 1f kabel s teplou izolací, 30 kV, 2 kA, 30 m



HTS kabel se studenou izolací



HTS kabel s teplou izolací



Dimenzování průřezu vodiče

Vodiče se musí dimenzovat tak, aby:

- jejich provozní teplota nebyla vyšší než je dovoleno
- vodiče byly dostatečně mechanicky pevné
- úbytek napětí ve vodičích byl ve stanovených mezích
- vodiče odolávaly dynamickým a tepelným účinkům zkratových proudů
- průřezy vodičů byly v hospodárných mezích

Dimenzování vodičů dle dovolené provozní teploty

- teplota izolace, resp. holého vodiče nesmí překročit dovolenou teplotu → provozní proud I_p nesmí překročit dovolené zatížení vodiče I_z , které závisí na uložení vodiče a okolní teplotě, tzn. chlazení vodiče

$$I_p \leq I_z = k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_i \cdot I_n$$

Dimenzování vodičů podle úbytku napětí

$$\Delta u \% = \frac{\sqrt{3} \cdot (R \cdot I_p \cdot \cos \varphi + X \cdot I_p \cdot \sin \varphi)}{U_n} \cdot 100 \% \leq 5 \%$$

Dimenzování podle účinků zkratových proudů

$$S_{\min} = \frac{I_{ke} \cdot \sqrt{t_k}}{K} \leq S$$

**Děkuji za pozornost,
doplňení prezentovaných informací
a vaše dotazy.**

Miloslava Tesařová

Západočeská univerzita v Plzni
Katedra elektroenergetiky a ekologie
