

## ÚVOD

Energetika představuje souhrn procesů získávání různých forem energie ze všech zdrojů, procesů přeměn a dopravy energie až po její konečné využití.

Po vědecké stránce je energetika vědou, která zkoumá a formuluje zákony jednotlivých energetických procesů, jejich vzájemnou vazbu a jejich návaznosti na jiné oblasti. Podstata energetických procesů spočívá v přeměně různých forem energie, přičemž dochází ke změnám druhů nebo nositelů energie nebo současně obojího. Každý druh energie je totiž vázán na určitého nositele, kterým může být látka pevná, kapalná nebo plynná. Energie vyskytující se v přírodě lze pouze výjimečně dopravovat nebo spotřebovat přímo, ve většině případů se musí přeměnit na jinou vhodnou formu, říkáme, že se energie musí zušlechtit.

### **Přírodní zdroje využívané v průmyslovém měřítku:**

- 1) Chemická energie paliv
  - a) tuhá – černé, hnědé uhlí, antracit, lignit, rašelina, dřevo
  - b) kapalná – ropa, zemní oleje
  - c) plynná – zemní a uhelný plyn
- 2) Vodní energie řek
- 3) Jaderná energie uranu

### **Alternativní zdroje:**

- 1) sluneční energie – přeměna na tepelnou a eventuelně na mechanickou a elektrickou
- 2) Sluneční energie – přímá přeměna na el. energii
- 3) Slapová energie – vodní energie mořského přílivu a odlivu
- 4) Větrná energie
- 5) Geotermální energie

### **Zdroje ve zkušebním provozu nebo ve výzkumu:**

- 1) Jaderná energie z jiných prvků než uran
- 2) Energie mořských vln
- 3) Teplotní spád vrstev mořské vody
- 4) Kosmické záření
- 5) Atmosférická elektřina.

Možnosti využití přírodních zdrojů energie jsou omezené. Proto mimo hledání nových zdrojů se hledají současně způsoby, jak lépe využít zdrojů dosavadních a tak prodloužit trvanlivost jejich zásob.

Elektroenergetika je obor energetiky, který se zabývá procesy výroby, dopravy a užití elektrické energie. Se stupněm rozvoje elektroenergetiky velmi úzce souvisí technický rozvoj všech průmyslových odvětví hospodářství, stavebnictví, dopravy, ale i životní úroveň obyvatelstva.

### **Charakteristické vlastnosti elektrické energie jsou:**

- usnadňuje růst produktivity práce
- zvyšuje hygienu a pohodlí života a v místě spotřeby není hluk, prach, výpary apod.
- umožňuje technický pokrok
- vysoká koncentrovanost umožňuje levnou výrobu ve vzdálených a méněhodnotných zdrojích a přenos do místa spotřeby
- možnost snadné přeměny na jiné formy energie
- přesné řízení a měření dodané energie

### **Nevýhodné vlastnosti:**

- neskladnost – spotřeba musí být v každém okamžiku krytá výrobou
- nebezpečnost – není postřehnutelná lidskými smysly

- vliv na životní prostředí – exhalace, emise ...

## HISTORICKÝ VÝVOJ VÝROBY A ROZVODU

- První praktické využití rozvodu vysokým napětím provedl francouzský fyzik **Marcel Depréz v roce 1881** – princip přenosu po telegrafním drátu  
v roce 1882 - přenos na vzdálenost 57 km napětím 1500-2000 V z Miesbachu do Mnichova (mezinárodní výstava v Mnichově). Přenášený výkon byl 2 ks, ztráty v přenosu 78%.
- U nás v roce 1884** v žižkovské plynárně se zřídila pokusná stanice pro výrobu a použití elektriny. 2 dynamy na ss proud (1 sériové pro obloukové lampy 1 derivační pro osvětlování žárovkami)
- Rok 1888** – první městská elektrárna na Žižkově (stejnoseměrná), rozvod dvou vodičový (120 V pro osvětlení žárovkami, 700 V pro osvětlení obloukem)  
Později se přešlo na třívodič 3 x 120 V.
- Rok 1886** – N.Tesla objevil princip točivého pole
- Rok 1888** – Dolivo Dobrovolski – asynchronní motor.
- Rok 1891** – Dolivo Dobrovolski - trojfázový přenos z Lauffenu do Frankfurtu na vzdálenost 175 km. V Lauffenu vodní turbína + alternátor 200 kVA, napětí 95 V + trafo 95/1500 V. Linka provedena měděnými vodiči o  $\phi$  4 mm. Energie použita pro osvětlení a dále pro pohon asm 100 ks. Účinnost přenosu 77 %.

## OSOBNOSTI ČESKÉ ELEKTROTECHNIKY

- F.A.Petřina – 1799 – 1855. Od roku 1844 řádným profesorem na pražské universitě. Byl Prvním Čechem, který se zabýval telegrafií.
- K.V.Zenger – 1830 – 1908 . Žák Petřinův. V roce 1863 jmenován prozatímním profesorem a pak řádným profesorem na české technice v Praze. Na jubilejní výstavě v roce 1891 uspořádal výstavu svých vynálezů a vědeckých prací (35 různých přístrojů a přes 240 pojednání v šesti různých jazycích.
- K.Domalip – 1846 – 1909. Je prvním přednášejícím o elektrotechnice.
- F. Křižík – 1847 – 1941 . Zdokonalil obloukovou lampu. Postavil krátkou elektrickou trať od lanové dráhy na Letné do Stromovky 800 m dlouhou. V roce 1896 postavil tramvaj z Karlína do Libně. Na počátku století staví elektrickou meziměstskou dráhu Tábor – Bechyně.
- J.Donát – 1858 – 1937. Konstruktor parních strojů, cukrovarské stroje, jeřáby, mosty. V roce 1887 založil v Brně elektrotechnický závod „Bartelmus, Donát a spol. Továrna vyrobila za dobu trvání 24 000 strojů, více než 1000 transformátorů Postavila 60 elektráren, 80 km elektrických sítí. V Donátově továrně působil i pozdější profesor pražské techniky Josef Sumec.
- E. Kolben – 1862 – 1943. Vystudoval pražskou techniku a odjel na zkušenou po Evropě a USA. Nastoupil jako elektroinženýr do konstrukčního oddělení v Edisonově továrně s platem 15 dolarů týdně. Zde se seznámil s N. Teslou. Po čtyři roky pracoval jako šéfkonstruktor. Z USA přešel do Švýcarska k firmě Oerlikon. Když odešel od firmy konstruktor C.L.Brown (založil s W.Boverim továrnu Brown, Boveri & Cie), nastoupil Kolben na místo konstruktéra. Ve své továrně zavedl jako první u nás trojfázovou síť. Další novinka v kolbence: stroje nebyly poháněny z transmise, ale každý stroj měl svůj motor.
- J. Sumec – 1867 – 1934. Absolvoval vysoké školy v Olomouci, Římě (doktor filosofie). V roce 1902 profesor na české technice v Brně. Zavedl výpočetní metody

do konstrukce. Zavedl na př. pojem A. závit/m, přesný kruhový diagram indukčních motorů. Zavedl teorii jednofázových motorů (repulsních, sériových derivačních). Objasnil komutační proces.

K. Novák – 1867 – 1941. Je zakladatelem konstruktivní elektrotechniky. V roce 1907 je jmenován profesorem konstruktivní elektrotechniky, která měla tři disciplíny – el. stroje, el. přístroje, elektrárny. Byl prvním předsedou ESČ, který vznikl v roce 1918 ze spolku českých elektrotechniků.

L. Šimek – 1875 – 1945. Měl velký vliv na rozvoj české silnoproudé, slaboproudé a zejména vysokofrekvenční elektrotechniky. Je spolu s prof. Sumcem a prof.

Novákem uznávaným tvůrcem a pilířem naší silnoproudé elektrotechniky Po první světové válce se jeho zásluhou uskutečnilo první

přímé bezdrátové spojení pražské petřínské vysílačky s vysílačkou Paříž-Eifel. Má neocenitelnou zásluhu o vybudování elektrotechnického oboru a vychoval celou řadu schopných inženýrů elektrotechniků.

V. List – 1887- . V roce 1909 je profesorem elektrotechniky v Brně. Velmi se zasloužil o organizaci, normalizaci a budování spolku ESČ. Autor mnoha knih, zejména několika svazkového „Technického průvodce“.

Roku 1899 postavena elektrárna hlavního města Prahy v Holešovicích s instalovaným výkonem 2500 kW, trojfázová s napětím 3000 V.

Počátky elektrizace jsou charakterizovány soupeřením mezi ss. a stř. rozvodem.

SS přenos – Švýcar Thury v roce 1906, 57 kV , 4600 kW na 180 km z Moutiers do Lyonu.

4 vodní turbíny + dva dvojité ss generátory izolované od země. Dvě měničny v Lyoně

s motory vn. Ty poháněly generátory nn. V roce 1927 systém rozšířen a délka vedení vzrostla o 80 km. Napětí zvýšeno na 125 kV. Přenášený výkon vzrostl na 19 MW.

**Převládá systém trojfázový. Hlavní důvody byly tyto:**

- a) velmi rychlý růst instalovaných výkonů elektráren
- b) záměna parních strojů pístových parními turbinami o vysokých výkonech a vysokých otáčkách
- c) potřeba odpovídajících el. generátorů o výkonech několika desítek tisíc kW s otáčkami až 3000 ot/min. – to nešlo dosáhnout ss stroji (problematika komutace).

Se vzrůstem výkonů elektráren a jejich vzdáleností od spotřeby rostlo i napětí potřebné pro přenos velkých výkonů na velké vzdálenosti.

V roce 1912 první vedení na 110 kV v Evropě. Po 1. světové válce zvýšeno na 220 kV. Další zvýšení pak na 400 kV. Stálý růst výkonů, vzdáleností a napětí ukázal, že 3 fázový systém má své hranice a je nutné hledat nové způsoby řešení přenosu na velké vzdálenosti. Při trojfázovém přenosu elektrické energie vystupují do popředí dva hlavní problémy:

- a) **problematika použití vysokého napětí**
- b) **problematika stability chodu celého systému.**

ad a) Při použití velmi vysokého napětí vystupuje do popředí otázka vzniku **korony** a otázka **izolace** vedení a transformoven. Korona (záření ve vzduchu) vzniká na silně zakřivených plochách a hrotech, při překročení tzv. počátečního napětí korony. Při napětích asi **nad 80 kV efektivních je korona** rozhodující pro volbu průměru vodičů a **spolurozhodující** pro volbu **vzdálenosti mezi vodiči** vzhledem ke ztrátám, které působí. Mimo to korona způsobuje poruchy v rozhlasovém vysílání (příjem) a dále vznik vyšších harmonických proudů a napětí v síti.

ad b) Přenášený výkon mezi dvěma trojfázovými systémy při daném napětí nemůže přestoupit určitou hodnotu. Při jejím překročení dochází k poruše (odpojení obou systémů), říkáme, že došlo k porušení podmínek stability přenosu.

obr.

## Přenos elektrické energie stejnosměrným proudem

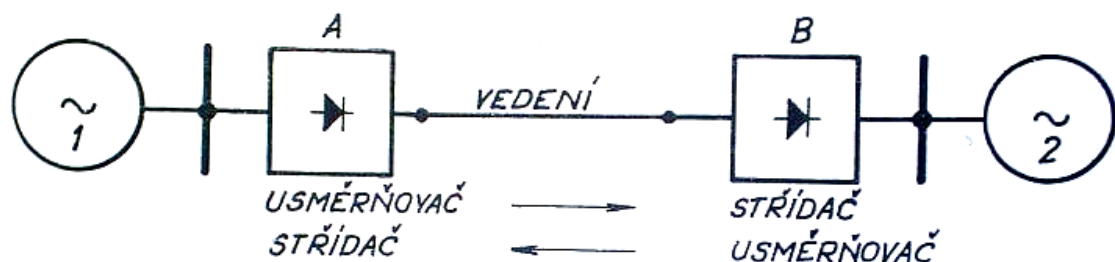
Při tomto způsobu přenosu odpadají potíže se stabilitou přenosu. SS přenos vyžaduje 2 vodiče – vedení je oproti 3 fázovému lacinější. Neexistuje jalový proud a tedy ani jalové ztráty. Ztráty korunou při ss přenosu jsou podstatně nižší než při přenosu střídavém. Můžeme proto volit menší průřezy vodičů. Ztráty korunou jsou v praxi při stejném vedení napájeném ss proudem 5 – 10 x menší, než při napájení střídavém, uvažujeme-li stejné  $U$  (výzkum – Švédsko rok 1946). Dlouho se uvažovalo, že při ss proudu je správné volit při stejném průměru vodičů a při stejných ztrátách korunou napětí mezi vodiči 2 x větší než při střídavém proudu. Tento názor potvrzovaly i četné pokusy provedené v laboratořích na vodičích různých průměrů a druhů.

Ale pokusy na pokusném vedení délky 480 m ve Švédsku v roce 1946 provedené střídavým i stejnosměrným proudem ukázaly, že při stejném maximálním napětí mezi vodiči, byly ztráty korunou při ss proudu 5 – 10 x menší než při proudu střídavém.

Tento překvapující výsledek byl vysvětlen později. Ukázalo se, že mezi vodiči, kde je ss napětí je celý prostor mezi nimi vyplněn ionty, které se mezi vodiči pohybují střední rychlostí několika desítek m/sec. Čím větší je objem vyplněný ionty, tím silněji omezuje jejich prostorový náboj proud korony. Čím větší je tedy vzdálenost vodičů, tím rychleji klesají ztráty korunou.

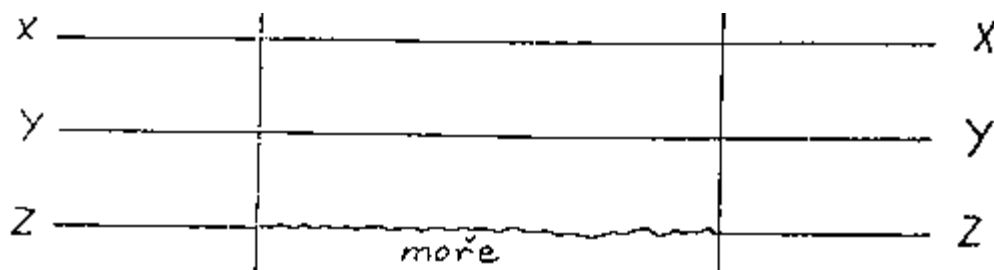
Při střídavém napětí 50 Hz se nedostanou ionty za dobu půlvlny dál od vodičů než na 15 – 20 cm. Objem s ionty je malý a nezávisí prakticky na vzdálenosti vodičů. Proto se ztráty korunou zmenšují při zvětšování vzdálenosti mezi vodiči mnohem pomaleji než u proudu stejnosměrného.

Schéma stejnosměrného přenosu je na obr. 1



Obr. 1

Zvláštní případy přenosu elektrické energie viz obr. 2



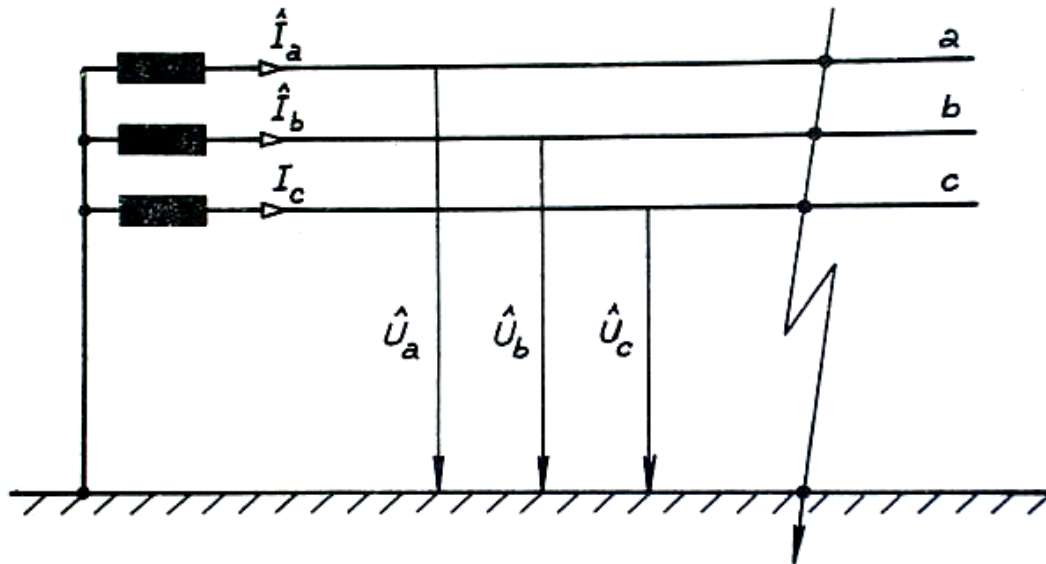
Obr. 2

## PROVOZ ENERGETICKÉHO SYSTÉMU Z HLEDISKA NULOVÉHO BODU

Energetický systém může být provozován:

- s uzemněným nulovým bodem (systém účinně uzemněný)
- uzemněný přes impedanci (Petersonova tlumivka)(systém neúčinně uzemněný)
- s izolovaným nulovým bodem

ad a) **účinně uzemněná soustava** obr. 3



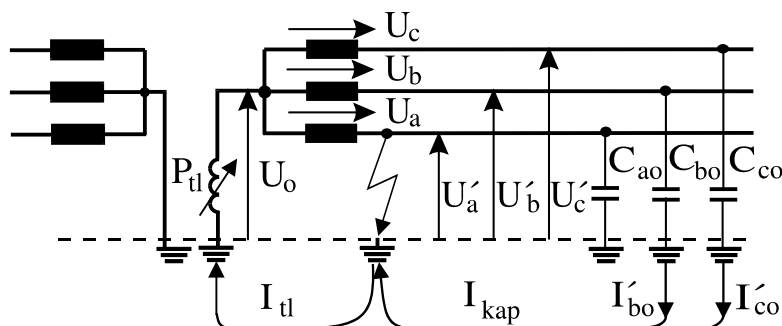
obr.3

Při poruše jedné fáze – jednopólový zkrat – musí dojít k okamžitému vypnutí. 80 % všech poruch je pouze v jedné fázi, proto je zaveden systém OZ (vypnuto – zapnuto – vypnuto), a proto je v každé fázi samostatně ovládaný vypínač.

Dvoufázový provoz 3fázové soustavy je možný, ale přenášený výkon klesne na  $\frac{S}{\sqrt{3}}$ .

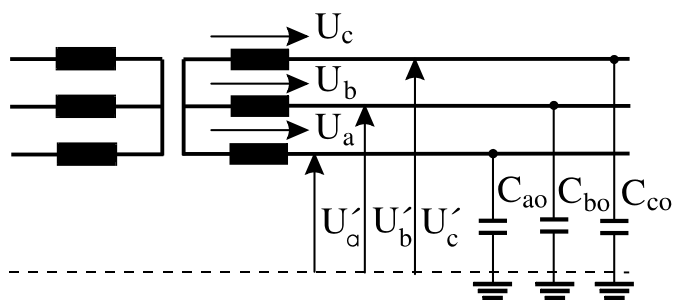
Ad b) **neúčinně uzemněná soustava** obr. 4

Při poruše teče do místa zemního spojení zemní kapacitní proud. Zhášecí tlumivka zpravidla omezí tyto proudy bez působení vypínače



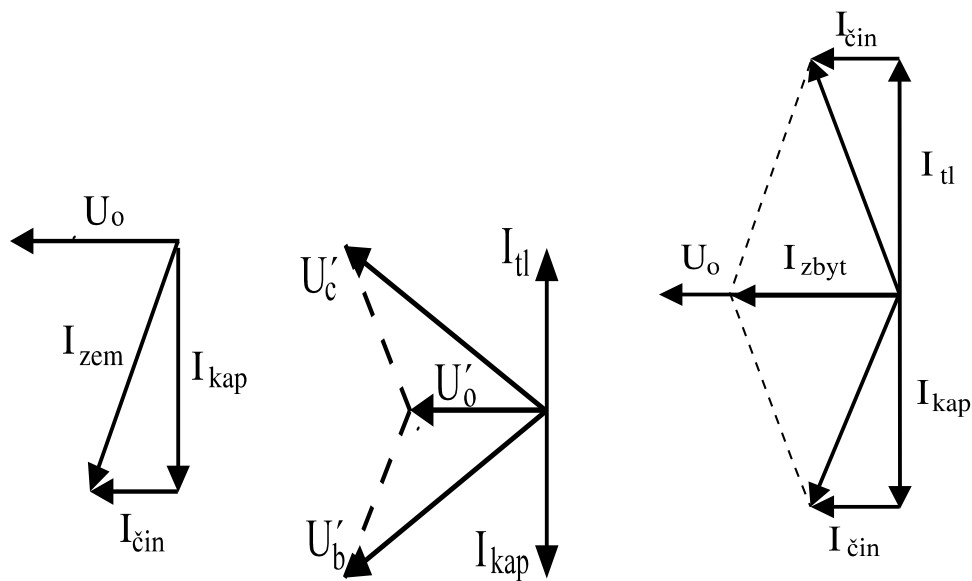
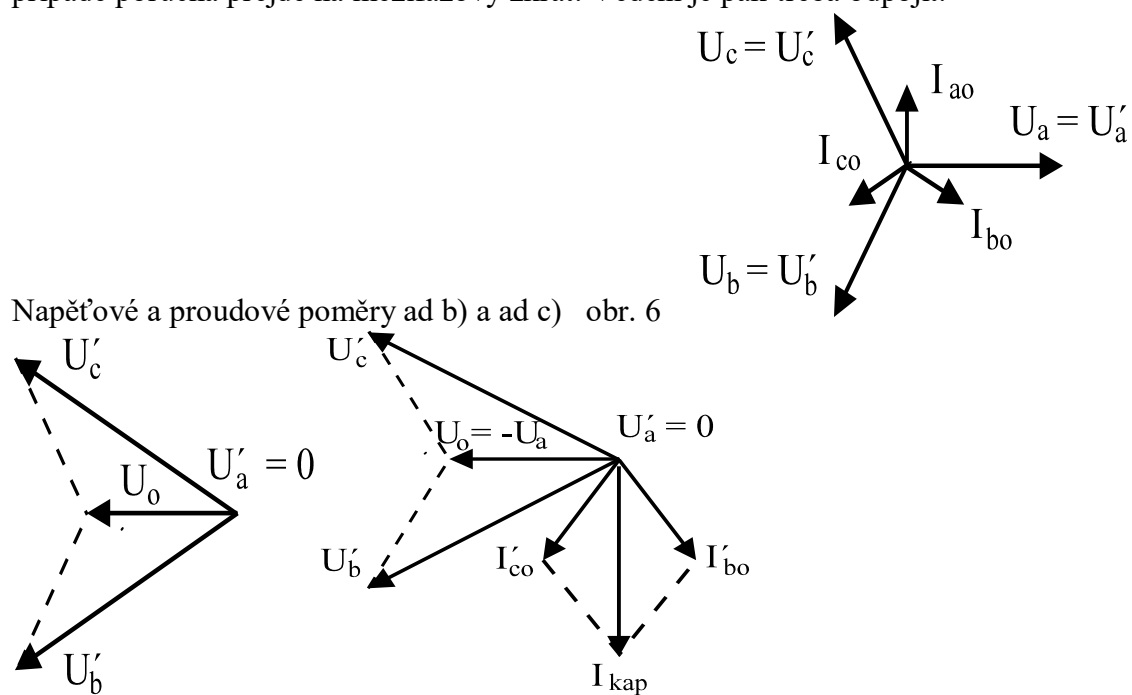
Obr. 4

Ad c) **izolovaná soustava** obr. 5



obr. 5

Při poruše, zpravidla značné kapacitní proudy vedou k obloukovému hoření, v krajním případě porucha přejde na mezifázový zkrat. Vedení je pak třeba odpojit.



Obr.6

Napětí zdravých fází x, y stoupne na hodnotu sdruženou.

Důsledky:

Vedení je třeba izolovat na hodnotu sdruženého napětí. Izolaci transformátoru je rovněž třeba dimenzovat na  $U$  sdružené .

Napěťové nastavení bleskojistek musí být o 25 % větší než v systémech přímo uzemněných.

Izolace rozveden musí být rovněž vyšší, spínací přepětí dosahují hodnot vyšších.

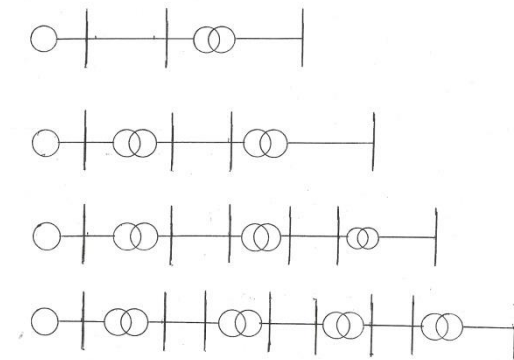
## SYSTÉMY ELEKTRICKÉHO ROZVODU

Podle účelu ke kterému sítě slouží můžeme sítě dělit na:

- **místní** (distribuční) – převážně nn
- **oblastní** – zkrhované sítě vn – 22 a 35 kV
- **nadřazené** – jsou to sítě vvn – 110,220,400 kV.

Na tyto sítě jsou napojeny všechny velkoelektrárny. Po této síti se uskutečňuje také mezinárodní spolupráce v předávání elektrické energie.

Poznámka: u nás se síť 110 kV začíná řadit do sítí oblastních. Z tohoto hlediska připadá u nás v úvahu maximálně čtverá transformace. Sítě jsou samozřejmě na příslušné izolační hladině vzájemně propojeny, čili netvoří pouhé paprsky, tak jak je uvedeno na obr. 7

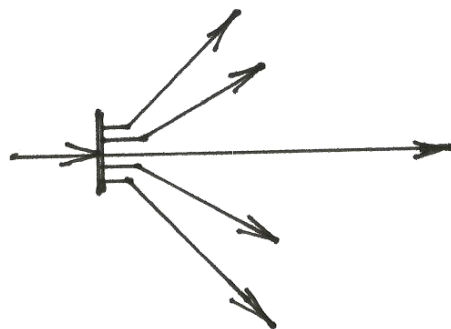


Obr. 7

## ROZDĚLENÍ ROZVODNÝCH SYSTÉMŮ PODLE ZPŮSOBŮ NAPÁJENÍ

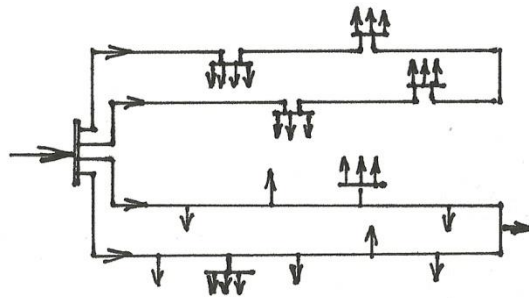
Nezákladnější typy:

a) paprskový rozvod obr. 8



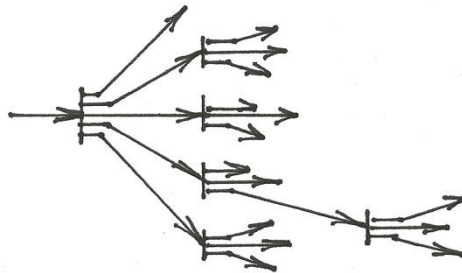
Obr. 8

b) okružní rozvod obr. 9



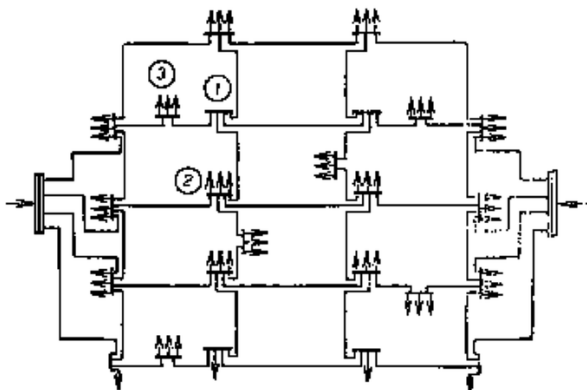
obr. 9

c) paprskový rozvětvený obr. 10



Obr. 10

d) mřížový rozvod obr. 11



obr. 11

Rozdělení napětí v ČR:

- 1) Malé napětí - mn
- 2) Nízké napětí - nn
- 3) Vysoké napětí - vn
- 4) Velmi vysoké napětí - vvn
- 5) Zvláště vysoké napětí - zvn
- 6) Ultra vysoké napětí - uvn



Jmenovité napětí – napětí na které je soustava dimenzována u střídavého napětí je to efektivní hodnota.

Nejvyšší trvalé provozní napětí – je rozhodující pro výpočet sítě  
Jmenovitá napětí vybraná podle mezinárodních předpisů IEC

$U_n$	$U_{max}$	$U_{zkuš. sin.}$	$U_{zkuš. rázové}$
6,6 kV	7,2 kV	27 kV	66 kV
22 kV	24 kV	55 kV	125 kV
110 kV	121 kV	185 kV <sup>+</sup>	450 kV <sup>+</sup>
220 kV	245 kV	335 kV <sup>+</sup>	900 kV <sup>+</sup>
380 kV	420 kV	630 kV <sup>+</sup>	1425 kV <sup>+</sup>

Znak + – při izolovaném uzlu napětí ještě vyšší

Pro elektrická zařízení se užívá ochranná hladina – plná a redukováná

Plná se používá pro izolované soustavy.

Řada jmenovitých napětí v ČR:

**6; 12; 24; (48) (V) 120; 230;400; 500 (V) 1;3;6;10;15;22;35 (kV) 110;220;400 (kV)**

mn

nn

vn

vvn

Podtržená napětí jsou v účinně uzemněném systému.

## ŘADA VÝSTUPNÍCH NAPĚTÍ TRANSFORMÁTORU

Tato napětí se liší od řady jmenovitých napětí. Do **35 kV** včetně je výstupní napětí o **5%** větší než jmenovité. Nad **35 kV** o **10%** větší než napětí jmenovité.

Tato výstupní napětí jsou volena s ohledem na úbytky napětí na vedení. Na konci vedení musí být napětí jmenovité.

V současné době nás rovněž zajímá nejnižší provozní napětí. Toto napětí je dáno průřezy vodičů, transformátory a požadavky spotřebičů.

Poznámka: jmenovitá napětí podle mezinárodní soustavy IEC se poněkud liší v některých hodnotách od řady ČR.

ČR kV	6	10	15	22	35	-	-	110	-	-	220	-	380
IEC kV	6,6	11	16	22	33	47	66	110	132	150	220	275	380

Řada napětí podle mezinárodních předpisů IEC

3,3; 6,6; 11;16;22;33;47;66;110;132;150;220;275;380 (kV)

Rusko:

3;6;10;20;35;110;150;220;330;400;500; ? 700 uvažuje se

6/6,9; 10/11,5; 35/40; 110/121; 220/242 <sup>jmenovité</sup> / nejvyšší možné

Německo:

3;10;20;60;110;220;380

řada 10 kV – 5;6;10 kV

řada 20 kV – 15;20 kV

řada 30 kV – 25;30 kV

10/11,5; 20/23; 30/35; 110/125; 220/250; 380/420 <sup>jmenovité</sup> / nejvyšší možné

Francie:

5,5; 15; 20;30;63;90;150;225;380

30/36; 225/250; 380/420 <sup>jmenovité</sup> / nejvyšší možné

Anglie:

3,3; 6,6; 11;22;33;44;66;88;110;132;165;220;275;400  
6,6/7,2; 11/12; 22/24; 110/121; 220/242; 400/400 <sup>jmenovité</sup> / nejvyšší možné

USA: 60 Hz

4,16; 7,2; 13,8; 14,4; 23; 34,5; 46; 69; 115; 138; 161; 230; 287,5; 330  
23/25,8; 115/121; 230/242 <sup>jmenovité</sup> / nejvyšší možné

Stejnoseměrné napětí: ( ovládání, signalizace, nouzové osvětlení atd.)  
12;24;48;60;110;220;440;600 V

Trakce stejnosměrná: (600); 750 V; 1500 V; 3000 V

## ES ČR

<u>Elektrárny</u>	počet	Inst.výkon	%	transformátory	inst.výkon transf.
Parní	44	9261 MW	64,8	400/220	1937 MVA
Jaderné	2	2760 MW	12,3	400/110	7320 MVA
Vodní	119	1372 MW	9,6	220/110	4793 MVA
Závodní	558	1893 MW	13,3		
Celkem	722	15286	100		14050 MVA

### Odběratelé:

Velkoodběratelé	20%
Maloodběratelé	30%
Účelová spotřeba	10 %
Ostatní odběry	2 %
Ztráty v sítích	8 %
VI.spotřeba el.	7 %
Čerpání ve vod. eln.	1 %

### Délka vedení:

400 kV	2600 km
220 kV	1600 km
110 kV	8000 km
22 kV	60000 km

## ZÁKLADNÍ ELEKTROENERGETICKÉ POJMY

Energetická soustava – soubor výroben energie elektrické, tepelné, jaderné se zařízením pro rozvod a spotřebu

Soustava centralizovaného zásobování teplem – část energetické soustavy zahrnující teplárny, výtopny, tepelný rozvod a tepelné spotřebiče včetně měřících regulačních a ovládacích zařízení

Elektrizační soustava – část energetické soustavy obsahující zařízení pro výrobu, rozvod a spotřebu elektrické energie

Samostatně provozovaná soustava – soustava, která není propojena s jinými elektrizačními soustavami

Propojená elektrizační soustava – soustava, která vznikla propojením elektrizačních soustav několika zemí se společným operativním řízením

Elektrické vedení – vodivé spojení pro přenos elektrické energie

Elektrická stanice – (transformovna, spínací stanice, měnárna, kompensovna) – stanice se zařízením, které slouží k transformaci, kompenzaci, přeměně nebo rozvodu elektrické energie

Elektrická síť – souhrn všech galvanicky spojených částí vedení a stanic téhož napětí, určený k přenosu, přeměně a rozvodu elektrické energie

Nadřazená síť – (400 kV, částečně 200 kV) – část elektrizační soustavy, která má z hlediska skladby nebo provozu větší důležitost vzhledem k částem elektrizační soustavy, které napájí a které jsou zpravidla nižšího napětí

Přenosová síť – část elektrizační soustavy, tvořící přenosovou cestu pro napájení velkých stanic nebo uzlů, zpravidla vyššího napětí

Rozvodná (distribuční) síť – část elektrizační soustavy, která slouží pro dodávku elektrické energie odběratelům

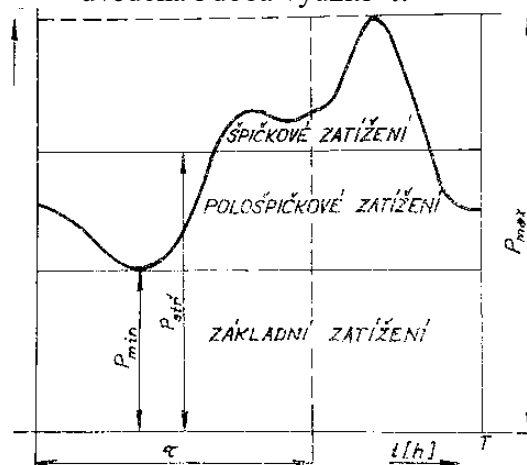
Elektrický rozvod – souhrn všech vzájemně propojených elektrických sítí a elektrických stanic

Elektrárny – (tepelné, jaderné, vodní) – výrobní, vyrábějící elektrickou energii

Teplárna – tepelná elektrárna s kombinovanou výrobou tepelné a elektrické energie

Instalovaný příkon  $P$  (MW, kW) – je součet jmenovitých příkonů všech připojených nebo připojitelných spotřebičů

Diagram zatížení – je průběh výkonů (příkonů) v závislosti na čase podle obr. 12, kde je uvedena i doba využití  $\tau$ .



Obr. 12

Rozeznáváme diagram denní (24 hodin), týdenní (24 · 7 = 168 h), měsíční (24 · 30 = 720 hodin), roční (24 · 365 = 8760 hodin)

Maximální zatížení  $P_{\max}$  (MW, kW) – je největší příkon (výkon) odebraný nepřetržitě po dobu 15 minut ve sledovaném období. Tato významná hodnota se zjišťuje z údajů speciálních měřících přístrojů (maxiprint, elektroměr s ukazatelem maxima)

Minimální zatížení  $P_{\min}$  (MW, kW) – je nejmenší zatížení ve sledovaném období. Určuje se podobně jako  $P_{\max}$

Základní zatížení – je to spodní část diagramu na obr. 12 pod minimálním zatížením

Pološpičkové zatížení – je oblast diagramu od minimálního do středního zatížení

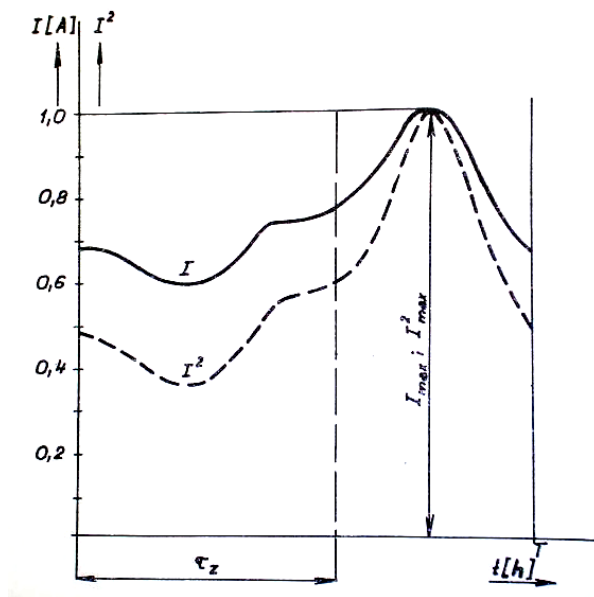
Špičkové zatížení – je to oblast diagramu nad středním zatížením

Doba využití  $\tau$  (h) – je to počet hodin po které můžeme používat maximální příkon  $P$  abychom spotřebovali stejnou práci jako při časově proměnném příkonu  $P(t)$  za celé sledované období  $T$

$$P_{\max} \cdot \tau = \int_0^T p(t) \cdot d(t)$$

$$\tau = \frac{\int_0^T p(t) \cdot d(t)}{P_{\max}}$$

Doba plných ztrát  $\tau_z$  (h) – je to doba, za níž maximální odebíraný proud  $I_{\max}$  způsobí ve sledovaném období stejné ztráty výkonu jako časově proměnný proud  $i(t)$ , viz obr. 13



Obr. 13

$$R \cdot I_{\max}^2 \cdot \tau_z = \int_0^T R \cdot i^2(t) \cdot d(t)$$

$$\tau_z = \frac{\int_0^T i^2(t) \cdot d(t)}{I_{\max}^2}$$

Náročnost  $\beta$  - je určena poměrem maximálního příkonu k instalovanému příkonu

$$\beta = \frac{P_{\max}}{P_i} \leq 1$$

Soudobost  $\delta$  - tento koeficient respektuje skutečnost, že maxima různých zařízení nejsou současná. Proto výsledné maximum bude menší, než součet maxim jednotlivých zařízení

$$P_{c \max} \leq \delta \cdot \sum_{k=1}^n P_{k \max}, \delta \leq 1$$

Roční poměrný přírůstek (trend)  $\alpha$  - je to přírůstek maxima ve dvou po sobě následujících letech vztažený na konec předchozího roku

$$\alpha = \frac{P_{\max 2} - P_{\max 1}}{P_{\max 1}}$$

$P_{\max 1}$  - je maximum na konci výchozího roku

$P_{\max 2}$  - je maximum na konci následujícího roku

Při znalosti průměrného ročního přírůstku  $\alpha$  se zjistí maximum po  $n$  rocích :

$$P_{\max n} = P_{\max 1} (1 + \alpha)^{n-1}$$

## ELEKTRICKÉ PARAMETRY VEDENÍ

V rozvodném zařízení pro určení provozních stavů (přechodných nebo ustálených) je nezbytné znát parametry tohoto zařízení. Určíme čtyři základní parametry, které jsou vztaženy na 1 km délky vedení a pro jednu fázi. Jsou to:

- 1) **Činný odpor**  $R_1$   $\Omega/\text{km}$
- 2) **Provozní indukčnost**  $L_1$   $\text{H}/\text{km}$
- 3) **Provozní kapacita**  $C_1$   $\text{F}/\text{km}$
- 4) **Svod**  $G_1$   $\text{S}/\text{km}$

Z těchto základních parametrů získáme další tzv. **odvozené parametry**:

### 1) Indukční reaktanci

$$X_1 = \omega L_1 = 2\pi f L_1 \quad (\Omega/\text{km}; 1/\text{s}; \text{H}/\text{km})$$

### 2) Kapacitní vodivost

$$B_1 = \omega C_1 = 2\pi f C_1 \quad (\text{S}/\text{km}; 1/\text{s}; \text{F}/\text{km})$$

Parametry, které jsou v podélném směru vedení tvoří **komplexní podélnou impedanci**

$$\bar{Z}_{l1} = R_1 + jX_1 \quad (\Omega/\text{km})$$

A parametry které jsou napříč vedení určují **komplexní příčnou admitanci**

$$\bar{Y}_{q1} = G_1 + jB_1 \quad (\text{S}/\text{km})$$

Podélný a příčný parametr určují tzv. **vlnovou komplexní impedanci**

$$\bar{Z}_{vl} = \sqrt{\frac{\bar{Z}_{l1}}{\bar{Y}_{q1}}} \quad (\Omega; \Omega/\text{km}; \text{S}/\text{km})$$

a tzv. **komplexní konstantu přenosu**

$$\bar{\gamma} = \sqrt{\bar{Z}_{l1} * \bar{Y}_{q1}} \quad (1/\text{km}; \Omega/\text{km}; \text{S}/\text{km})$$

$$\bar{\gamma} = \alpha + j\beta$$

Reálnou část přenosové konstanty  $\alpha$  (1/km) nazýváme měrný útlum.

Imaginární část  $\beta$  (1/km) nazýváme měrný posuv. Vedení pro přenos energie mohou být buď venkovní nebo kabelová a přenos v nich probíhá vždy za jiných fyzikálních podmínek a proto budou i parametry obou vedení rozdílné.

## Elektrické parametry venkovních vedení

Venkovní vedení se provádí z vodičů plného průřezu nebo se používají lanové vodiče buď z jednoho materiálu (Cu, Al, Fe). U venkovních vedení 220, 400 kV a výše se používají vodiče lanové z materiálu Al a Fe (AlFe lana) a tzv. svazkové vodiče.

## Činný odpor

Pro určení činného odporu uvažujeme rovnoměrné rozdělení proudu v celém průřezu. Dále pak respektujeme řadu dalších vlivů jako např. teplotu, skin efekt ( $u \approx$  proudu), nerovnoměrnost průřezu, vliv spojek, materiál vodiče. Při průchodu stejnosměrného proudu platí pro činný odpor:

$$R = \rho \frac{l}{s} \quad (\Omega; \Omega \text{mm}^2/\text{km}; \text{km}; \text{mm}^2)$$

a vztaženo na 1 km vedení

$$R = \frac{\rho}{s} \quad (\Omega/\text{km}; \Omega \text{mm}^2/\text{km}; \text{mm}^2)$$

kde  $\rho$  je měrný odpor vodiče při teplotě  $t = 20^\circ\text{C}$   
 $s$  je průřez vodiče

Měrné odpory pro obvykle používané materiály při  $20^\circ\text{C}$ :

Cu	$\rho = 0,01784$	( $\Omega \text{mm}^2/\text{m}$ )
Al	$\rho = 0,0287$	( $\Omega \text{mm}^2/\text{m}$ )
Fe	$\rho = 0,130$	( $\Omega \text{mm}^2/\text{m}$ )

Hliník má malou pevnost, proto používáme lana AlFe. Typy: AlFe3; AlFe4; AlFe6 – u lan předpokládáme, že vede pouze hliník.

Pro vodiče existuje normalizovaná řada průřezů:

0,5; 0,75; 1; 1,5; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 35; 50; 70; 95; 120; 150; 185; 210; 240; 300; 350; 400; 500 mm.

U lanových vodičů se uvažuje tzv. matematický průřez  $s_m$ . Je to součet matematických průřezů všech drátů, které tvoří lano.

Matematický průřez drátu se určuje z jmenovitého průměru drátu.

## **Závislost odporu na teplotě**

$$R_t = R_{20} (1 + \alpha \cdot \Delta t) \quad \alpha - \text{teplotní činitel odporu} \quad (1/^\circ\text{C})$$

$$R_{20} - \text{odpor při teplotě okolí } 20^\circ\text{C} \quad (\Omega)$$

$$\text{Teplotní činitel pro některé materiály} \quad \Delta t = t_2 - t_1$$

$$t_2 - \text{nová teplota} \quad (^\circ\text{C})$$

$$t_1 - \text{počáteční teplota} \quad (^\circ\text{C})$$

$$\text{Cu} - \alpha = 0,00417 \quad (1/^\circ\text{C})$$

$$\text{Al} - \alpha = 0,00387 \quad (1/^\circ\text{C})$$

$$\text{Fe} - \alpha = 0,0048 \quad (1/^\circ\text{C})$$

## **Závislost odporu na kmitočtu:**

$$R' = k \cdot R$$

$k$  ....je koeficient respektující vliv skin efektu

Hodnota činitele  $k$  je :

- pro nemagnetický materiál

$$k = 1 + 7,5 f^2 \cdot d^4 \cdot 10^{-7}$$

f – je kmitočet

d – je průměr vodiče

b) pro magnetický materiál

$$k = 1 + \frac{1}{12} \left(\frac{m}{2}\right)^4 - \frac{1}{180} \left(\frac{m}{2}\right)^8 + \dots$$

$$m = 2\pi r \sqrt{\frac{2f\mu_r}{\rho 10^9}}$$

$\rho$  - měrný odpor

$\mu_r$  - rel.permeabilita

r - poloměr vodiče

vezmeme-li prvé dva členy rozvoje pro k tj.  $1 + \frac{1}{12} \left(\frac{m}{2}\right)^4$

a položíme  $\mu_r = 1$  tj. nemagnetický materiál dostaneme vztah

$$k = 1 + 7,5 f^2 d^4 \cdot 10^{-7}$$

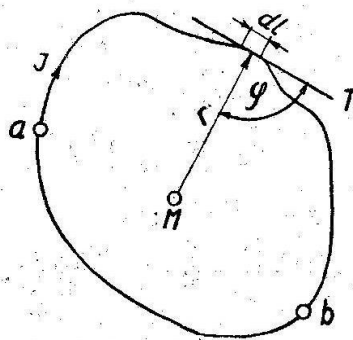
V souvislosti s odporem vodičů je zajímavý i odpor **ZEMĚ** při jejím použití jako vodiče. Zde odpor **ZEMĚ** nezávisí prakticky na měrném odporu země. Proud se totiž při větším měrném odporu rozšíří na větší průřez.

$$R_z = \pi^2 \cdot f \cdot 10^{-4} \quad (\Omega/\text{km})$$

Pro  $f = 50 \text{ Hz}$  bude  $R_z \approx 0,05 \text{ } (\Omega/\text{km})$

### Indukčnost

Pro určení indukčnosti potřebujeme znát celkový magnetický tok  $\Phi$  vyvolaný proudem I protékající vodičem. Vycházíme z představy nekonečně dlouhého vodiče lineárního, který je sám v prostoru (homogenním). Siločáry magnetického pole takového vodiče jsou kružnice jejichž roviny jsou kolmé



obr.14

na geometrickou osu vodiče, která je současně i geometrickým místem jejich středů.

V praxi je nutné uvažovat lineární vodič konečné délky. Ten si představíme jako smyčku obr.14 protékanou proudem I. Intenzitu magnetického pole v libovolném bodě na př. M určíme pomocí Biot – Savartova zákona pro element dl protékaný proudem I:

$$d\vec{H} = \frac{1}{4\pi} \frac{I[d\vec{l} \times \vec{r}]}{r^3} = \frac{1}{4\pi} \frac{I \cdot r \cdot dl \cdot \sin \varphi}{r^3} = \frac{I \cdot \sin \varphi \cdot dl}{4\pi \cdot r^2}$$

Výsledná intenzita magnetického pole v bodě M vytvořená celou smyčkou bude :

$$\vec{H} = \oint \frac{I \cdot \sin \varphi}{4\pi \cdot r^2} dl$$

Představíme-li si smyčku rozdělenou body 1, 2 na dvě části bude

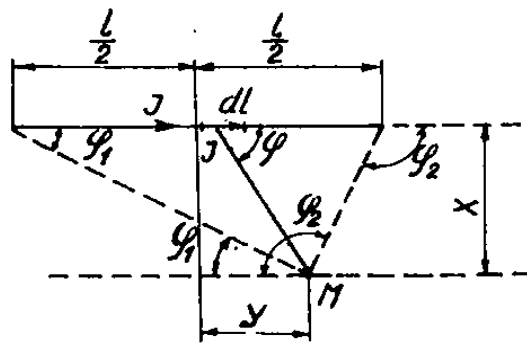
$$\vec{H} = \int_1^2 \frac{I \cdot \sin \varphi}{4\pi \cdot r^2} dl + \int_2^1 \frac{I \cdot \sin \varphi}{4\pi \cdot r^2} dl = \vec{H}' + \vec{H}''$$

Složka  $\vec{H}' = \int_1^2 \frac{I \cdot \sin \varphi}{4\pi \cdot r^2} dl$  je intenzita magnetického pole vytvořená vodičem 1--2

protékáným proudem I. Představme si čistě teoreticky, že tento vodič je přímkový a nalézá se sám v prostoru. Potom magnetické siločáry jsou kružnice v rovinách kolmých na jeho osu, která je zároveň geometrickým místem jejich středů. V uvažovaném bodě M bude tedy intenzita magnetického pole

$$\vec{H} = \int_{-\frac{l}{2}}^{+\frac{l}{2}} \frac{I \cdot \sin \varphi}{4\pi \cdot r^2} dl$$

Znáznorníme-li situaci na obrázku obr.15 potom



obr.15

intenzita magnetického pole v místě M způsobena vodičem o délce l bude:

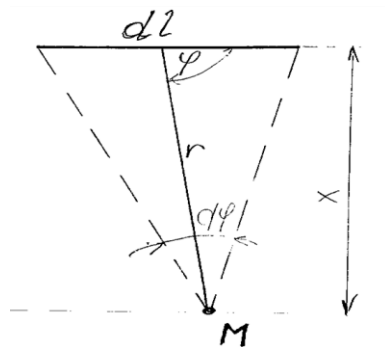
$$\vec{H} = \int_{-\frac{l}{2}}^{+\frac{l}{2}} \frac{I \cdot \sin \varphi}{4\pi \cdot r^2} dl$$

Z rovnosti oblouků opsaných průvodičem plyne z obr.16 podle sinové věty:



$$\frac{dl}{\sin d\varphi} = \frac{r}{\sin \varphi}$$

$dl \cdot \sin \varphi = r \cdot \sin d\varphi$  pro  $d\varphi \rightarrow 0$  je  $\sin d\varphi = d\varphi$  a tedy  
 $dl \cdot \sin \varphi = r \cdot d\varphi$



obr.16

Sinová věta:  $a : b : c = \sin \alpha : \sin \beta : \sin \gamma$ .

Z obr.16 plyne  $\sin \varphi = \frac{x}{r} \Rightarrow r = \frac{x}{\sin \varphi}$ ,

Potom lze psát

$$\begin{aligned} \bar{H} &= \int_{-\frac{l}{2}}^{+\frac{l}{2}} \frac{I \cdot \sin \varphi}{4\pi \cdot r^2} dl = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \frac{I \cdot \sin \varphi}{4\pi \cdot x} d\varphi = \frac{I}{4\pi \cdot x} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sin \varphi d\varphi = \\ &= \frac{I}{4\pi \cdot x} [-\cos \varphi]_{\varphi_1}^{\varphi_2} = \frac{I}{4\pi \cdot x} (-\cos \varphi_2 + \cos \varphi_1) = \frac{I}{4\pi \cdot x} (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2) \end{aligned}$$

Magnetická indukce v bodě M potom bude

$$\bar{B} = \mu_0 \mu_r \cdot \bar{H} \quad \text{kde} \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \left[ \frac{H}{m} \right] \quad \text{a} \quad \mu_r = 1 \quad \text{pro vzduch.}$$

### Vlastní indukčnost vodiče

Celkový magnetický tok  $\Phi$  vyvolaný proudem I ve vodiči bude:

$$\Phi = L \cdot I = \Phi' + \Phi''$$

kde tok  $\Phi'$  je tzv. vnější magnetický tok (vně vodiče) a  $\Phi''$  je t.zv. vnitřní magnetický tok (tok uvnitř vodiče).

Vnější magnetický tok vodiče, vyvolaný průtokem proudu I vodičem o poloměru r bude

$$\Phi' = \int_r^{\infty} \int_{-\frac{l}{2}}^{+\frac{l}{2}} B \cdot dx dy = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot I}{4\pi} \int_r^{\infty} \frac{dx}{x} \int_{-\frac{l}{2}}^{+\frac{l}{2}} (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2) dy$$

Z obr.15 lze vyjádřit

$$\cos \varphi_1 = \frac{y + \frac{l}{2}}{\sqrt{x^2 + (y + \frac{l}{2})^2}} \quad \cos \varphi_2 = \frac{y - \frac{l}{2}}{\sqrt{x^2 + (y - \frac{l}{2})^2}}$$

A po dosazení do výrazu pro  $\Phi'$  bude:

$$\begin{aligned} \Phi' &= \frac{\mu_0 \mu_r}{4\pi} I \int_r^\infty \frac{dx}{x} \int_{-\frac{l}{2}}^{+\frac{l}{2}} \left( \frac{y + \frac{l}{2}}{\sqrt{x^2 + (y + \frac{l}{2})^2}} - \frac{y - \frac{l}{2}}{\sqrt{x^2 + (y - \frac{l}{2})^2}} \right) dy = \\ &= \frac{\mu_0 \mu_r}{4\pi} I \int_r^\infty \frac{dx}{x} \left[ \sqrt{x^2 + (y + \frac{l}{2})^2} - \sqrt{x^2 + (y - \frac{l}{2})^2} \right]_{-\frac{l}{2}}^{+\frac{l}{2}} = \frac{\mu_0 \mu_r}{4\pi} I \int_r^\infty \frac{dx}{x} \left( \sqrt{x^2 + l^2} - x - x + \sqrt{x^2 + l^2} \right) = \\ &= \frac{\mu_0 \mu_r}{4\pi} I \int_r^\infty 2 \left( \sqrt{x^2 + l^2} - x \right) \frac{dx}{x} = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} I \int_r^\infty \frac{\sqrt{x^2 + l^2} - x}{x} dx = \\ &= \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} I \int_r^\infty \left( \frac{l^2}{x \cdot \sqrt{x^2 + l^2}} + \frac{x}{\sqrt{x^2 + l^2}} - 1 \right) dx = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} I \left[ l^2 \cdot \left( -\frac{1}{l} \cdot \ln \frac{\sqrt{x^2 + l^2} + l}{x} \right) + \sqrt{x^2 + l^2} - x \right]_r^\infty = \\ &= \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} I \left[ -l \cdot \ln \frac{\sqrt{x^2 + l^2} + l}{x} + \sqrt{x^2 + l^2} - x \right]_r^\infty = \\ &= \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} I \left[ -0 + \infty - \infty + l \cdot \ln \frac{\sqrt{r^2 + l^2} + l}{r} - \sqrt{r^2 + l^2} + r \right] = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} I \left[ l \cdot \ln \frac{\sqrt{r^2 + l^2} + l}{r} - \sqrt{r^2 + l^2} + r \right] \end{aligned}$$

Protože délka vodiče  $l$  je mnohem větší než poloměr  $r$  potom pro  $l \gg r$  bude

$$\sqrt{r^2 + l^2} \cong l \quad \text{a} \quad r - l \cong -l$$

a tedy

$$\Phi' = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} I \left[ l \cdot \ln \frac{2l}{r} - l + r \right] = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} I \left[ l \cdot \ln \frac{2l}{r} - l \right] = L' \cdot I$$

Porovnáním obou stran rovnice pro  $\Phi'$  dostaneme vztah pro dílčí vlastní indukčnost vodiče vztahenou k jeho vnějšímu magnetickému toku

$$L' = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} l \left( \ln \frac{2l}{r} - 1 \right)$$

Druhou část vlastní indukčnosti ( dílčí indukčnost  $L'$  ), která je vztahena k magnetickému toku uvnitř vodiče určíme z energetické úvahy. Energie magnetického pole uvnitř vodiče je rovna

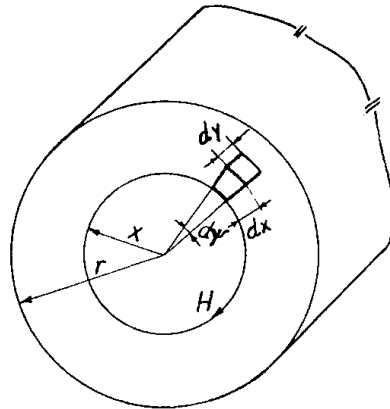
$$A = \frac{1}{2} \int_V B \cdot H dV$$

$dV$  – je objemový element vodiče

$V$  - je celkový objem vodiče

Stanovme objemový element  $dV$  vodiče ve válcových souřadnicích vzhledem k ose vodiče.

Potom podle obr.17 bude



obr.17

$$dV = x \cdot dx \cdot dy \cdot dz$$

a energie magnetického pole uvnitř vodiče bude

$$A = \frac{\mu_0 \mu_r}{2} \int_0^l \int_0^{2\pi} \int_0^r H^2 \cdot x dx dy dz$$

Předpokládáme stejnosměrný proud nebo proud střídavý o takovém kmitočtu, kdy lze zanedbat skin efekt. Potom je proud stejnoměrně rozložen po celém průřezu a potom pro intenzitu magnetického pole na poloměru  $x$  platí vztah

$$2\pi \cdot x \cdot H_x = \frac{I}{\pi \cdot r^2} \cdot \pi \cdot x^2$$

$$H_x = \frac{x}{2\pi \cdot r^2} \cdot I$$

Po dosazení do výrazu pro  $A$

$$A = \frac{\mu_0 \mu_r}{2} \int_0^l \int_0^{2\pi} \int_0^r \left( \frac{x}{2\pi \cdot r^2} \right)^2 \cdot I^2 \cdot x dx dy dz = \frac{\mu_0 \mu_r}{2} \int_0^l \frac{x^2}{4\pi^2 r^4} I^2 l 2\pi \cdot x dx =$$

$$= \frac{\mu_0 \mu_r}{4\pi \cdot r^4} I^2 l \int_0^r x^3 dx = \frac{\mu_0 \mu_r}{4\pi \cdot r^4} I^2 l \left[ \frac{x^4}{4} \right]_0^r = \frac{\mu_0 \mu_r}{4\pi \cdot r^4} I^2 l \cdot \frac{r^4}{4} = \frac{\mu_0 \mu_r}{4\pi} I^2 \frac{l}{4}$$

dostaneme

$$A = \frac{\mu_0 \mu_r}{4\pi} I^2 \frac{l}{4} = \frac{1}{2} L' I^2$$

a porovnáním dostáváme vztah pro dílčí vlastní indukčnost

$$L'' = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} \cdot \frac{l}{4}$$

Potom tedy celková vlastní indukčnost přímého lineárního vodiče 1, který se nachází sám v prostoru bude:

$$L = L' + L'' = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} l \left( \ln \frac{2l}{r} - 1 \right) + \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} \cdot \frac{l}{4} = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} l \left( \ln \frac{2l}{r} - 1 + \frac{1}{4} \right) = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} l \left( \ln \frac{2l}{r} - 0.75 \right)$$

Dosadíme-li za  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \left[ \frac{H}{m} \right]$  a  $\mu_r = 1$

bude

$$L = 2 \cdot 10^{-7} l \left( \ln \frac{2l}{r} - 0.75 \right) \quad [H]$$

Vztah upravíme na obvykle používané jednotky ( mH/km) a současně zaměníme přirozený logaritmus za dekadický.

Potom

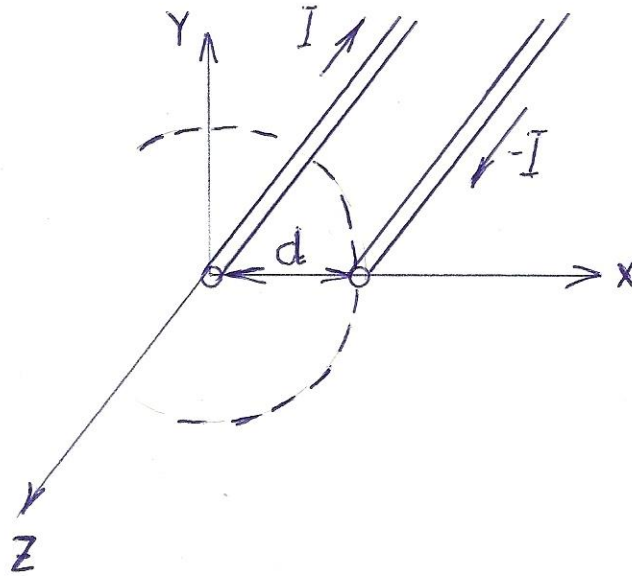
$$L = 0,2 \cdot 2,3 \log \frac{2l}{r} - 0,75 \cdot 0,2$$

$$L = 0,46 \cdot \log \frac{2l}{r} - 0,15 \quad [mH/km]$$

### Vzájemná indukčnost

Vzájemná indukčnost dvou obvodů závisí na společném magnetickém toku  $\Phi_s$  obou obvodů. Předpokládejme, že máme v daném prostoru dva přímé lineární vodiče o stejném poloměru  $r$  a stejné délce  $l$  a vodičem 1 protéká proud  $I$ . Oba vodiče jsou rovnoběžné ve vzájemné vzdálenosti  $d$ . Potom koeficient vzájemné indukčnosti mezi oběma vodiči je podmíněn společnou částí vnějšího magnetického podle  $\Phi'$  vodiče 1 podle obr.18. Tedy

$$\Phi' = \int_d^{\infty} \int_{-\frac{l}{2}}^{+\frac{l}{2}} B dx dy = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} I \left( l \cdot \ln \frac{\sqrt{d^2 + l^2} + l}{d} + d - \sqrt{l^2 + d^2} \right)$$



obr.18

a opět předpokládáme, že délka  $l$  je mnohem větší než vzdálenost vodičů  $d$ ,  $l \gg d$ , což je u vedení splněno. Potom platí, že

$$\sqrt{d^2 + l^2} \cong l; \quad d - l \cong -l$$

a tedy

$$\Phi' = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} I \cdot l \left( \ln \frac{2l}{d} - 1 \right) = M \cdot I$$

Porovnáním dostaneme vztah pro vzájemnou indukčnost

$$M = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} \cdot l \left( \ln \frac{2l}{d} - 1 \right)$$

Dosadíme za  $\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7}$  [H/m] = 0,4 $\pi$  [mH/km];  $l = 1$  km

$$M = \frac{0,4\pi}{2\pi} \left( \ln \frac{2l}{d} - 1 \right) = 0,2 \ln \frac{2l}{d} - 0,2 \quad [\text{mH/km}]$$

a po úpravě

$$M = 0,46 \log \frac{2l}{d} - 0,2 \quad [\text{mH/km}]$$

### Indukčnost venkovních vedení

Známe-li postup pro určení vlastní a vzájemné indukčnosti pro jeden vodič v prostoru, můžeme potom spočítat na podkladě indukčního zákona výslednou indukčnost v libovolném vícevodičovém uspořádání. Přitom pojem celková (úhrnná) indukčnost – platí pro n-fázový systém nebo trojfázový systém při nesymetickém zatížení, provozní indukčnost - platí pro dvouvodičový systém (smyčku) a pro třívodičový systém při

souměrném zatížení

V dalším předpokládáme:

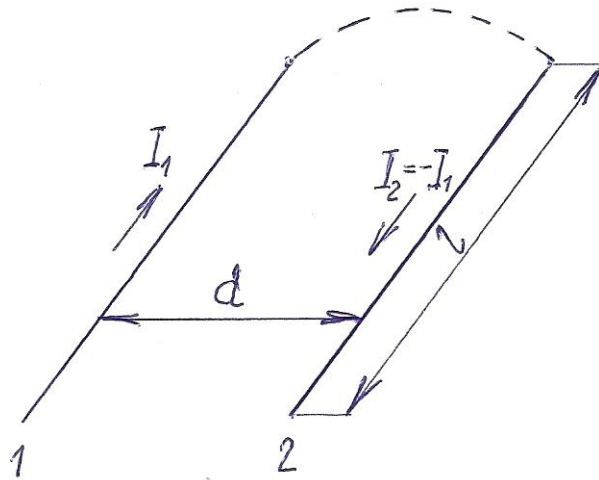
napájecí soustava napětí je symetrická

vedení je jednoduché, trojfázové a je obecně uspořádané.

Jako úvod odvodíme provozní indukčnost dvou vodičového vedení a indukčnost trojfázového vedení. Prochází-li daným vedením střídavý proud  $i$

$$i = I_m \cdot \sin \omega t$$

indukuje se v každém z vodičů (reaktanční napětí) elektromotorická síla od vlastní indukčnosti  $L$  podle obr.19



obr.19

$$e_{pL} = -L_{vl} \frac{di}{dt} \quad \text{nebo} \quad E_{pL} = -j\omega L_{vl} I$$

a od vzájemné indukčnosti

$$e_{pM} = -M \frac{d(-i)}{dt} \quad \text{nebo} \quad E_{pM} = -j\omega M(-I) = j\omega M \cdot I$$

A tedy výsledná elektromotorická síla (reaktanční napětí) pro jeden vodič bude:

$E_p = E_{pL} + E_{pM} = -j\omega L_{vl} I + j\omega M \cdot I = -j\omega(L_{vl} - M)I = -j\omega L_p I$ . Porovnáním dostaneme vztah pro hledanou provozní indukčnost  $L_p$ :

$$L_p = L_{vl} - M$$

po dosazení za  $L_{vl}$  a  $M$

$$L_p = 0,46 \log \frac{2l}{r} - 0,15 - 0,46 \log \frac{2l}{d} + 0,2$$

$$L_p = 0,46 \log \frac{d}{r} + 0,05 \quad [\text{mH/km}]$$

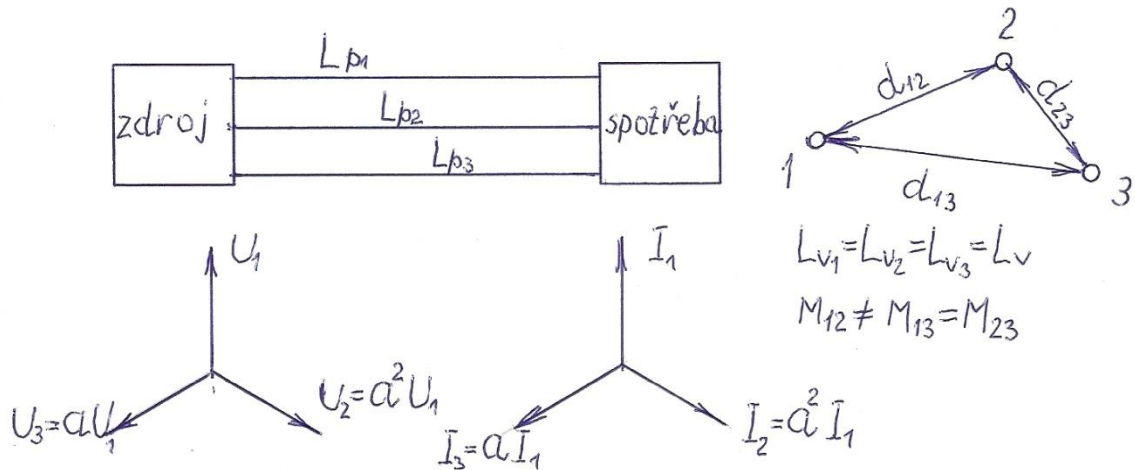
Tuto výslednou indukčnost označujeme jako provozní  $L_p$ .

## Jednoduché trojvodičové vedení

Zopakujme, že napájecí soustava napětí je symetrická. Třífázové vedení je jednoduché, vodiče jsou uspořádány v obecném trojúhelníku. Soustava proudů ve vedení bude souměrná – předpokládáme symetrický odběr.

Situaci vidíme na obr.20

$$a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad ; \quad a^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad ; \quad a + a^2 + a^3 = 0 \quad , \quad a + a^2 = -1 \quad , \quad a^3 = 1$$



obr.20

S použitím výsledků pro dvouvodičové vedení, platí vztahy pro jednotlivá reaktanční napětí.

$$E_{1p} = E_{1v1} + E_{12M} + E_{13M}$$

$$-j\omega L_{1p} I_1 = -j\omega L_{v1} I_1 - j\omega M_{12} a^2 I_1 - j\omega M_{13} a I_1$$

Podobně pro vodič 2 a 3

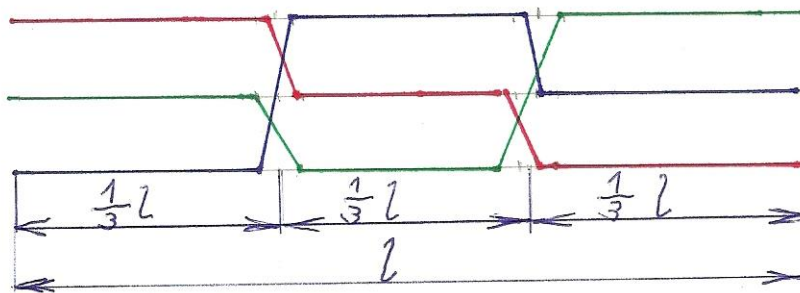
Z těchto rovnic po patričné úpravě dostaneme vztahy platné pro obecný trojfázový systém.

$$L_{1p} = L_{1v1} + a^2 M_{12} + a M_{13}$$

$$L_{2p} = L_{2v1} + a M_{21} + a^2 M_{23}$$

$$L_{3p} = L_{3v1} + a^2 M_{31} + a M_{32}$$

Vidíme, že provozní indukčnosti jednotlivých fází jsou různé. To by u dlouhých vedení vvn při zatížení symetrickou zátěží vyvolalo úbytky napětí v každé fázi jiné (nestejné). Tedy i při souměrném zatížení by vznikla napěťová nesymetrie. Vedení proto uměle symetrizujeme. Toho docílíme křížením vodičů, čemuž říkáme transpozice vedení. Transpozici vidíme na obr.21



obr.21

Transpozicí fázových vodičů je vyloučen vliv rozdílných elektromagnetických vazeb, takže vedení se chová z hlediska uspořádání jako symetrické tj. uspořádané v rovnostranném trojúhelníku.

Protože platí:

$$M_{12} = M_{21} ; M_{13} = M_{31} ; M_{23} = M_{32}$$

$$L_{1vl} = L_{2vl} = L_{3vl} \dots \dots \text{pro stejný poloměr vodičů}$$

bude indukčnost každé fáze u transponovaného vedení

$$L_p = \frac{1}{3} (L_{1p} + L_{2p} + L_{3p}) = \frac{1}{3} [3L_{vl} + (a + a^2)M_{12} + (a + a^2)M_{13} + (a + a^2)M_{23}]$$

$$L_p = L_{vl} - \frac{1}{3} (M_{12} + M_{13} + M_{23})$$

Dosadíme známé vztahy pro  $L_{vl}$  a  $M$

$$L_p = 0,46 \log \frac{2l}{r} - 0,15 - \frac{1}{3} (0,46 \log \frac{2l}{d_{12}} - 0,2 + 0,46 \log \frac{2l}{d_{13}} - 0,2 + 0,46 \log \frac{2l}{d_{23}} - 0,2)$$

$$L_p = 0,46 \log \frac{\sqrt[3]{d_{12}d_{13}d_{23}}}{r} + 0,05 \text{ [mH/km]}$$

Výraz  $\sqrt[3]{d_{12}d_{13}d_{23}} = d_s$  označíme jako střední geometrickou vzdálenost fázových vodičů.

Potom

$$L_p = 0,46 \log \frac{d_s}{r} + 0,05 \text{ [mH/km]}$$

Reaktance bude

$$X_p = \omega L_p \cdot 10^{-3} \text{ [\Omega/km]}$$

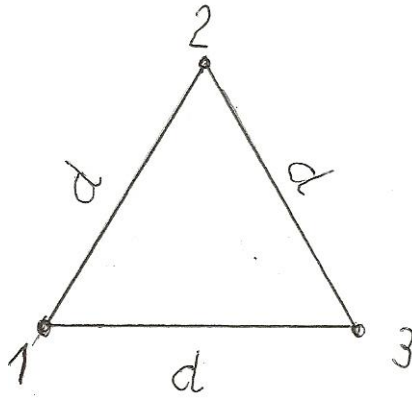
### Zvláštní případy geometrického uspořádání vedení

a) Rovnostranný trojúhelník obr.22

$$\text{Platí: } d_{12} = d_{13} = d_{23} = d$$

$$M_{12} = M_{13} = M_{23} = M$$





Obr.22

Reaktanční napětí podle dřívějšího bude:

$$E_p = E_{v1} + E_m + E_m = E_{v1} + 2E_m$$

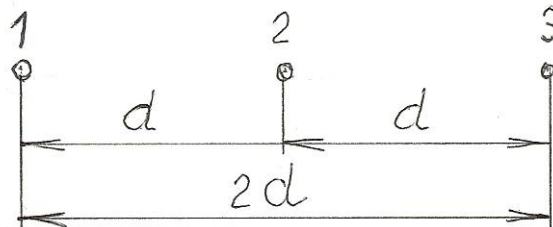
$$-j\omega L_p \cdot I_1 = -j\omega L_{v1} I_1 - j\omega M a^2 I_1 - j\omega M a I_1$$

$$-j\omega L_p \cdot I_1 = -j\omega I_1 [ L_{v1} + (a^2 + a) M ] = -j\omega(L_{v1} - M)$$

$$L_p = L_{v1} - M$$

$$L_p = 0,46 \log \frac{d}{r} + 0,05 \quad [\text{mH/km}]$$

b) Horizontální rovina – obr. 23 např. vedení 400 kv ; 220 kV  
jeden vodič na fázi



Obr.23

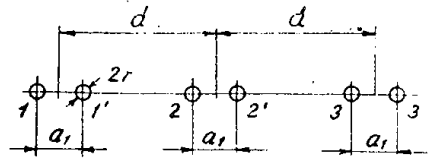
Po transpozici počítáme  $s \ d_s = \sqrt[3]{d \cdot d \cdot 2d} = d \cdot \sqrt[3]{2}$   
potom

$$L_p = 0,46 \log \frac{d_s}{r} + 0,05 \quad [\text{mH/km}]$$

$$L_p = 0,46 \log \frac{\sqrt[3]{2} \cdot d}{r} + 0,05 \quad [\text{mH/km}]$$

Provozní indukčnost svazkového transponovaného vedení

Pro nejvyšší přenosová napětí je nutné používat buď dutých vodičů (Švýcarsko) nebo svazkových vodičů. Důvodem pro takovéto řešení je snaha snížit ztráty korunou a snaha zvýšit přenosové schopnosti vedení. U nás svazkový vodič obr. 24



Obr.24

Reaktanční napětí budou pro vodič 1:

$$E_{1vl} = -j\omega L_{1vl} \frac{I_1}{2} \quad E_{12} = -j\omega 2M_{12} a^2 \frac{I_1}{2} \quad \text{zde } M_{12} \cong M_{12'}$$

$$E_{11'M} = -j\omega M_{11'} \frac{I_1}{2} \quad E_{13M} = -j\omega 2M_{13} a \frac{I_1}{2} \quad \text{zde } M_{13} \cong M_{13'}$$

protože  $d + m \cong d$

$$E_{1p} = E_{1vl} + E_{11'M} + E_{12M} + E_{13M}$$

$$-j\omega L_{p1} \frac{I_1}{2} = -j\omega L_{1vl} \frac{I_1}{2} - j\omega M_{11'} \frac{I_1}{2} - j\omega 2M_{12} a^2 \frac{I_1}{2} - j\omega 2M_{13} a \frac{I_1}{2}$$

$$L_{p1} = L_{1vl} + M_{11'} + a^2 2M_{12} + a 2M_{13}$$

Protože podle předpokladu je vedení transponované platí:

$$M_{12} = M_{13} = M_{23} = M$$

Potom

$$L_{1p} = L_{1vl} + M_{11'} + a^2 2M + a 2M = L_{1vl} + M_{11'} + (a^2 + a) \cdot 2M$$

$$L_{1p} = L_{1vl} + M_{11'} - 2M$$

$$L_{1p} = 0,46 \log \frac{2l}{r} - 0,15 + 0,46 \log \frac{2l}{m} - 0,2 - 2 \cdot 0,46 \log \frac{2l}{d_s} + 2 \cdot 0,2$$

$$L_{1p} = 0,46 \log \frac{2l \cdot 2l}{r \cdot m} - 0,35 - 0,46 \log \frac{2l \cdot 2l}{d_s^2} + 0,4$$

$$L_{1p} = 0,46 \log \frac{d_s^2}{r \cdot m} + 0,05 \quad [\text{mH/km}]$$

$$L_{1p} = 2 \cdot 0,46 \log \frac{d_s}{\sqrt{r \cdot m}} + 0,05 \quad [\text{mH/km}]$$

To je provozní indukčnost jednoho vodiče. Provozní indukčnost svazku (dva vodiče paralelně) bude

$$L_{p \text{ svazku}} = \frac{L_{1p}}{2} = 0,46 \log \frac{d_s}{\sqrt{r \cdot m}} + \frac{0,05}{2} \quad [\text{mH/km}]$$

Výraz  $\sqrt{r \cdot m}$  označíme  $r_n$ , tedy  $r_n = \sqrt{r \cdot m}$  a rozumíme jím t.zv. náhradní poloměr svazku. Obecně pro  $n$  vodičů ve svazku bude

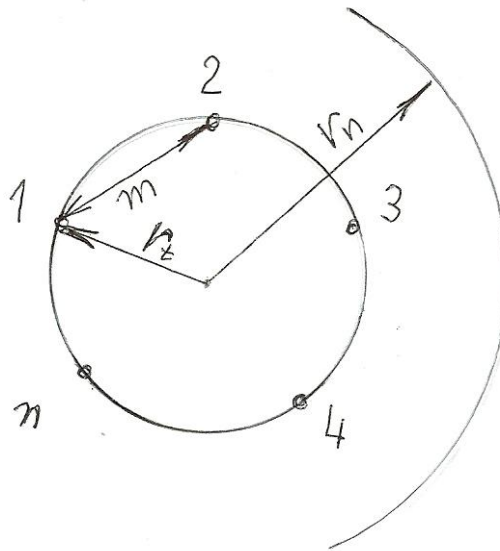
$$r_n = \sqrt[n]{r \cdot m^{n-1}} = r^{\frac{1}{n}} \cdot m^{\frac{n-1}{n}}$$

$$L_{p_{svazku}} = 0,46 \log \frac{d_s}{r_n} + \frac{0,05}{n}$$

Poznámka:

svazková vzdálenost bývá 25 – 60 cm = m, vodiče jsou uspořádány do pravidelného n – úhelníka o poloměru  $r_t$  viz obr.25

U (kV)	n	m (cm)
400	3	40
750	4	60
1150	8	
1800	16	

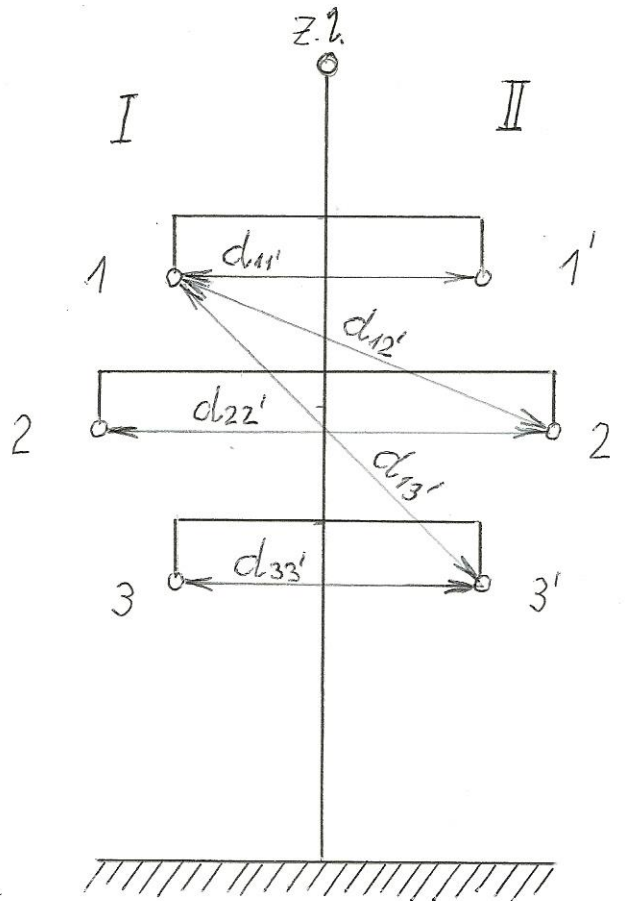


obr.25

### Indukčnost dvojitého vedení

Předpoklad:

vedení je netransponované, obě vedení přenášejí různé výkony. Uspořádání vedení je vidět na obr. 26



obr.26

$$I_1 \neq I_1'; I_2 \neq a^2 I_1'; I_2' = a^2 I_1'; I_3 = a I_1; I_3' = a I_1'$$

$$E_{1v1} = -j\omega L_{v1} I_1$$

$$E_{M11'} = -j\omega M_{11'} I_1$$

$$E_{M12} = -j\omega M_{12} a^2 I_1$$

$$E_{M13} = -j\omega M_{13} a I_1$$

$$E_{M12'} = -j\omega M_{12'} a^2 I_1$$

$$E_{M13'} = -j\omega M_{13'} a I_1$$

$$E_{1p} = E_{1v1} + E_{M11'} + E_{M12} + E_{M12'} + E_{M13} + E_{M13'} = -j\omega I_1 [ L_{v1} + M_{11'} + a^2 (M_{12} + M_{12'}) + a (M_{13} + M_{13'}) ] = L + M + [(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}) (M_{12} + M_{12'}) + (-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}) (M_{13} + M_{13'})]$$

Protože

$$E_{1p} = -j\omega L_{1p} I_1$$

dostaneme po porovnání

$$L_{1p} = L_{v1} + M_{11'} - \frac{1}{2} (M_{12} + M_{12'} + M_{13} + M_{13'}) - j\frac{\sqrt{3}}{2} (M_{13} + M_{13'} - M_{12} - M_{12'})$$

Po dosazení:

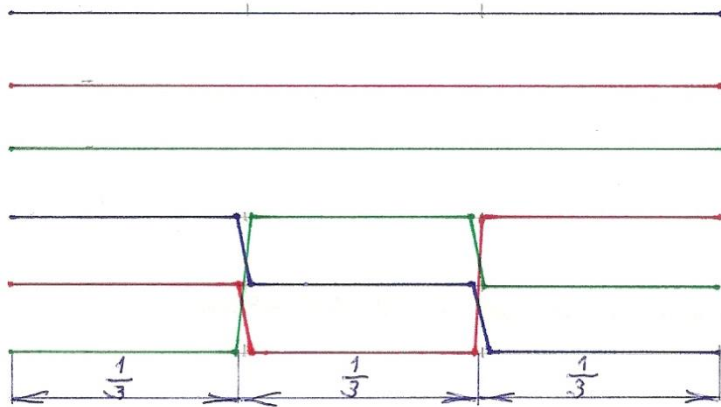
$$L_{1p} = 0,46 \log \frac{\sqrt{d_{12} \cdot d_{12'} \cdot d_{13} \cdot d_{13'}}}{r \cdot d_{1r}} - j \sqrt{3} \cdot 0,46 \log \sqrt{\frac{d_{13} \cdot d_{13'}}{d_{12} \cdot d_{12'}}} + 0,05 \quad [\text{mH/km}]$$

### Transpozice trojfázových dvojitých vedení

Ve všech uvažovaných případech je vedení provozováno jako paralelní přenáší stejný výkon a zatížení.

a) vedení I je netransponované

vedení II je transponované 3x jak je uvedeno na obr.27



Obr. 27

Uvažujeme působení proudu ve vodičích 2,3,1',2',3' na vodič 1.

$$L_{1p} = L_{1vl} + a^2 M_{12} + a M_{13} + \frac{1}{3} (M_{11'} + a^2 M_{12'} + a M_{13'} + a M_{11'} + M_{12'} + a^2 M_{13'} + a^2 M_{11'} + a M_{12'} + a M_{13'})$$

$$L_{1p} = L_{1vl} + a^2 M_{12} + a M_{13} + \frac{1}{3} M_{11'} (1 + a + a^2) + \frac{1}{3} M_{12'} (a^2 + 1 + a) + \frac{1}{3} M_{13'} (a + a^2 + 1)$$

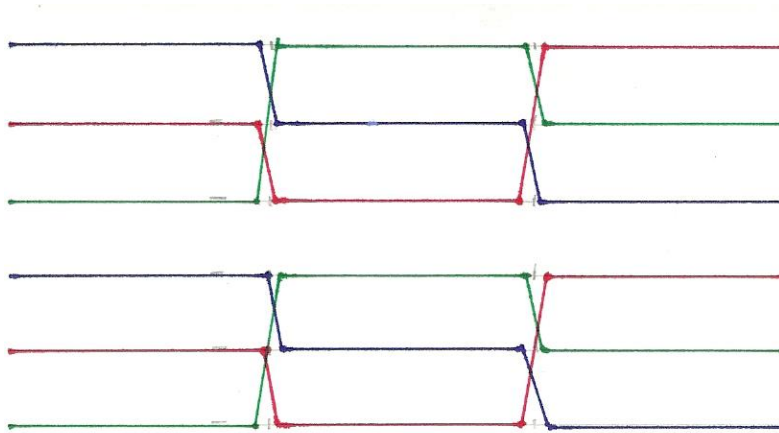
$$L_{1p} = L_{1vl} + a^2 M_{12} + a M_{13}$$

$$L_p = \frac{1}{3} (L_{1p} + L_{2p} + L_{3p})$$

$$L_p = 0,46 \log \frac{3 \sqrt{d_{12} \cdot d_{13} \cdot d_{23}}}{r} + 0,05 \quad [\text{mH/km}]$$

Závěr : vliv vedení II na I je vyloučen, ale vedení I je netransponované.

b) vedení I i II je transponované 3 x viz obr.28



Obr. 28

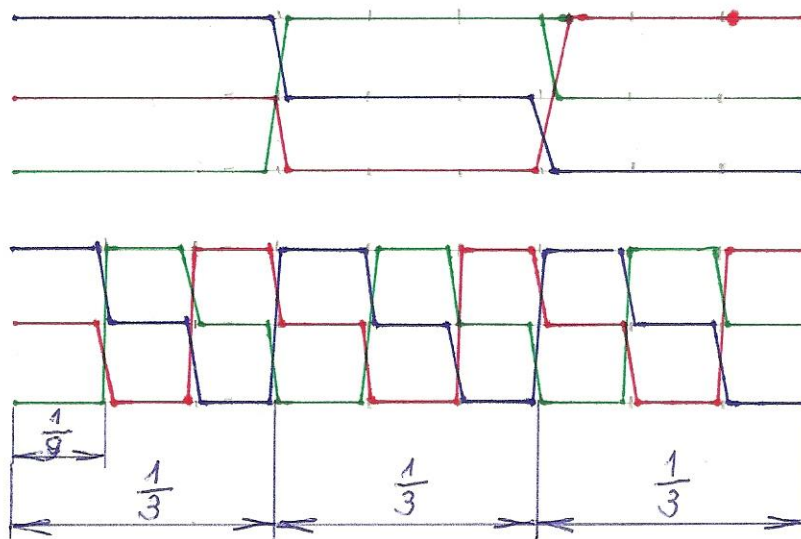
$$L_{1p} = L_{1vl} + \frac{1}{3} (a^2 M_{12} + a M_{13} + M_{11}' + a^2 M_{12}' + a M_{13}') + \frac{1}{3} (a M_{21} + a^2 M_{23} + a M_{21}' + M_{22}' + a^2 M_{23}') + \frac{1}{3} (a^2 M_{31} + a M_{32} + a^2 M_{31}' + a M_{32}' + M_{33}')$$

$$L_{1p} = L_{1vl} + \frac{1}{3} [M_{11}' + M_{22}' + M_{33}' + (a^2 + a)(M_{12} + M_{12}') + (a^2 + a)(M_{13} + M_{13}') + (a^2 + a)(M_{23} + M_{23}')] ]$$

$$L_{1p} = 0,46 \log \frac{3 \sqrt{d_{12} \cdot d_{12}' \cdot d_{13} \cdot d_{13}' \cdot d_{23} \cdot d_{23}'}}{r \cdot \sqrt[3]{d_{11}' \cdot d_{22}' \cdot d_{33}'}} + 0,05 \quad [\text{mH/km}]$$

Závěr: vliv vedení II na vedení I zůstává, můžeme provozovat pouze jako paralelní.

- c) vedení I transponováno 3 x  
 vedení II transponováno 9 x viz obr.29



Obr.29

Vyšetříme pouze 1/3, ostatní z důvodů symetrie stejné.

$$L_{1p} = L_{1vl} + \frac{1}{3} (a^2 M_{12} + a M_{13} + a M_{21} + a^2 M_{23} + a^2 M_{31} + a M_{32}) +$$

$$+ \frac{1}{9} (M_{11}' + a^2 M_{12}' + a M_{13}' + a M_{11}' + M_{12}' + a^2 M_{13}' + a^2 M_{11}' + a M_{12}' + M_{13}')$$

$$L_{1p} = L_{1vl} + \frac{1}{3} a^2 (M_{12} + M_{23} + M_{13}) + \frac{1}{3} a (M_{12} + M_{13} + M_{23}) +$$

$$+ \frac{1}{9} (M_{11}' + M_{12}' + M_{13}' + M_{11}' + M_{12}' + M_{13}' + M_{11}' + M_{12}' + M_{13}')(1 + a + a^2)$$

$$d_{13} = d_{31}' \Rightarrow M_{13}' = M_{31}'$$

$$d_{12} = d_{21}' \Rightarrow M_{12}' = M_{21}'$$

$$L_{1p} = L_{1vl} + \frac{1}{3} (a^2 + a) (M_{12} + M_{13} + M_{23})$$

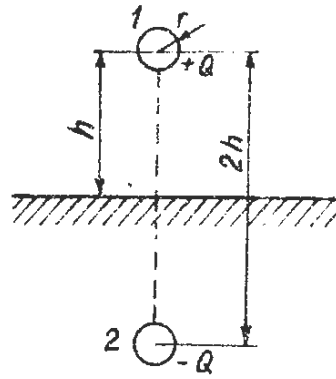
$$L_{1p} = 0,46 \log \frac{3\sqrt{d_{12} \cdot d_{13} \cdot d_{23}}}{r} + 0,05 \quad [\text{mH/km}]$$

Závěr: tímto provedením transpozice vyloučíme vliv vzájemného působení obou vedení, ale je to velmi drahé. Hodí se obecně pro přenos různých výkonů na dlouhé vzdálenosti.

Poznámka: U dvojitých paralelních vedení se hodnota indukčnosti (reaktance) zvyšuje o 5 ÷ 10 % oproti jednoduchému vedení.

### Indukčnost vodič -zem

Podle metody Kelvinova zrcadlení teče zpětný proud v hloubce  $h$  zemí podle obr.30



obr.30

Platí vztahy pro  $L_{v1}$  a  $M$  odvozené pro smyčku.

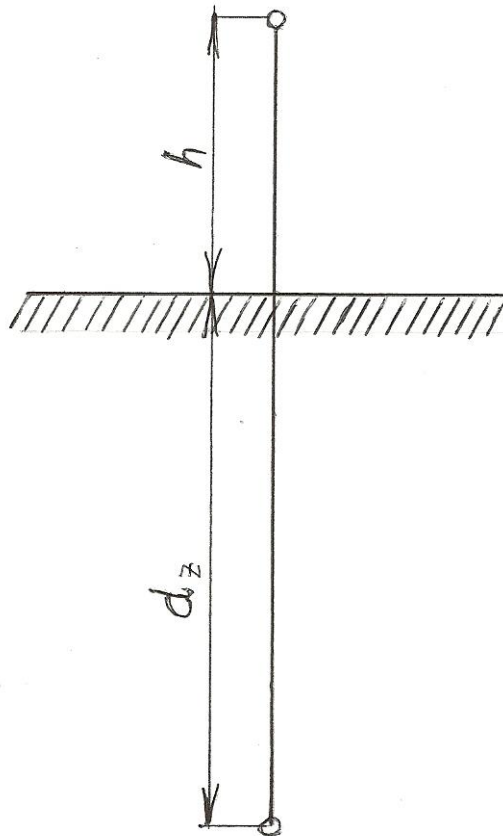
$$L_{v1} = 0,46 \log \frac{1}{r} - 0,15 \quad [\text{mH/km}]$$

$$M = 0,46 \log \frac{1}{2h} - 0,2 \quad [\text{mH/km}]$$

$$L_{v-z} = L_{v1} - M = 0,46 \log \frac{2h}{r} + 0,05 \quad [\text{mH/km}]$$

$$X_{v-z} = \omega L_{v-z} \cdot 10^{-3} \quad [\Omega/\text{km}]$$

Ve skutečnosti tomu tak není. Měření ukázala, že zemní proud se vrací v hloubce  $d_z$  (t.zv. zemní návratová cesta) viz obr.31



obr.31



$$d_z = \frac{2,085 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{f \cdot \lambda \cdot 10^{-9}}} \quad [\text{m}]$$

kde  $\lambda$  je měrná vodivost země [ $1/\Omega \cdot \text{cm}$ ]. Pro různé vodivosti  $\lambda$  bude  $d_z$  :

$d_z = 935 \text{ m} \cong 1000 \text{ m}$	$\lambda = 10^{-4}; f = 50 \text{ Hz}$
$d_z = 3000 \text{ m}$	$\lambda = 10^{-5}; f = 50 \text{ Hz}$
$d_z = 94 \text{ m} \cong 100 \text{ m}$	$\lambda = 10^{-2}; f = 50 \text{ Hz}$

Potom platí vztah:

$$L_{v-z} = 0,46 \log \frac{d_z + h}{r} + 0,05 \quad [\text{mH/km}]$$

Protože je  $d_z \gg h$  bude:

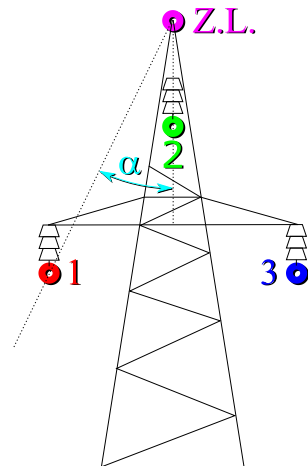
$$L_{v-z} = 0,46 \log \frac{d_z}{r} + 0,05 \quad [\text{mH/km}]$$

Poznámka:

Vliv zemního lana na provozní indukčnost při souměrném zatížení je nulový.

Při souměrném zatížení platí:  $\overline{I_R} + \overline{I_S} + \overline{I_T} = 0$

Při vyšetřování magnetických záběrů s vodičem 1 podle obr.32 docházíme k závěru, že  $M_{1-zl} = 0$



Obr.32

Zemní lano nemá vliv na provozní indukčnost při souměrném zatížení. Zemní lano brání přímým zásahům blesku do fázových vodičů a snižuje velikost atmosférických přepětí.

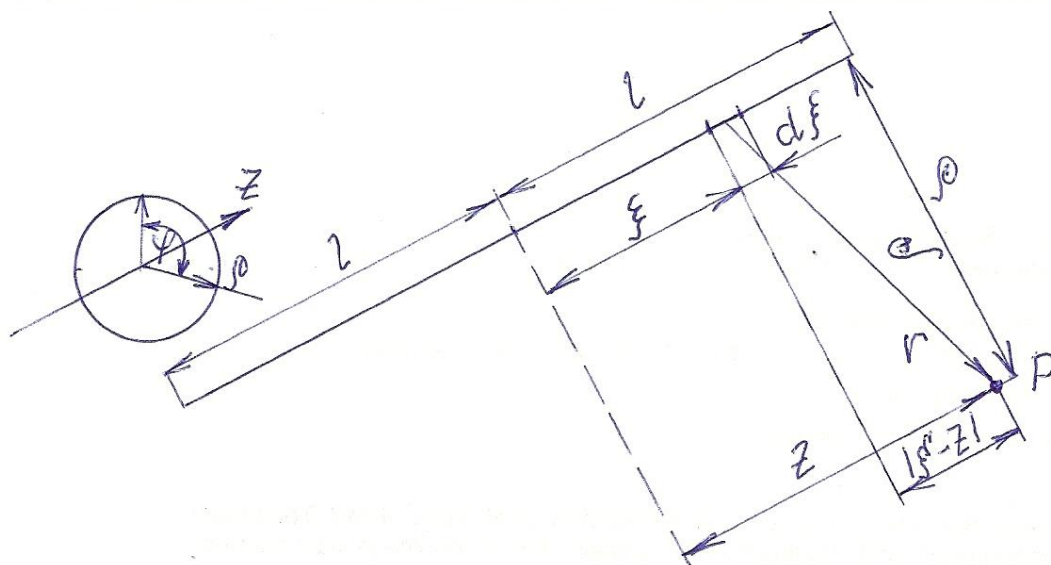
Má tzv. ochranný úhel  $\alpha = 20^\circ \div 25^\circ$ .

Při nesymetrickém zatížení vznikají v z.l. ztráty. V zahraničí se začíná odzemňovat.

### Kapacita

Jakmile se systém skládá z více než dvou vodičů včetně země nebo jakékoliv obálky (např. olověný plášť u kabelů) tedy vyjímáme případy vodič – země, dva vodiče z nichž jeden zcela obklopuje druhý, potom nelze mluvit o jednoduché kapacitě systému, ale je třeba uvažovat různé dílčí kapacity jednak mezi vodiči a jednak mezi vodičem a zemí nebo jinou obálkou.

U obecného  $n$  – vodičového systému existuje  $n$  – dílčích kapacit vůči zemi nebo jiné obálce a  $\frac{n(n-1)}{2}$  dílčích kapacit mezi jednotlivými vodiči. Systém  $n$  – fázových vodičů má potom celkem  $\frac{n(n+1)}{2}$  dílčích kapacit. Náboj každého vodiče je určen napětím proti ostatním vodičům a proti zemi respektive jiné obálce a dílčími kapacitami mezi konkrétním vodičem a ostatními vodiči. Nemají-li vodiče společnou obálku, je možné za obálku považovat zem. Předpokládejme v prostoru válcový vodič značně dlouhý. Potom platí, že náboj na vodiči je rovnoměrně rozložen a vodič pro další nahradíme jeho osou (vodivou přímkou) s nábojem  $Q$  na jednotku délky. Ve válcových souřadnicích  $(z, \rho, \varphi)$  je situace znázorněna na obr. 33



Obr. 33

Potenciál v bodě P prostorového náboje ve vzdálenosti  $r$  od elementárního množství  $Qd\xi$  bude

$$U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \int_{-l}^{+l} \frac{Qd\xi}{r} = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \int_0^{+l} \frac{d\xi}{\sqrt{\rho^2 + (\xi - z)^2}} = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \frac{l - z + \sqrt{\rho^2 + (l - z)^2}}{-z + \sqrt{\rho^2 + z^2}}$$

Protože podle předpokladu je  $l \gg z$  nezávisí potenciál  $U$  na souřadnici  $z$  a potom

$$U = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \frac{l + \sqrt{\rho^2 + l^2}}{\rho}$$

a protože je  $l \gg \rho$  je

$$U = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \frac{2l}{\rho} = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \rho + \frac{Q}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln 2l = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \rho + K$$

$$U = - \frac{Q}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \rho + K$$

Zvolme nyní potenciál vnějšího obalového válce o poloměru  $\rho_0$  roven nule. Potom bude potenciál od vyšetřovaného vodiče v libovolném místě obalového (vnějšího) válce

$$- \frac{Q}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \rho_0 + K = 0$$

a integrační konstanta  $K$

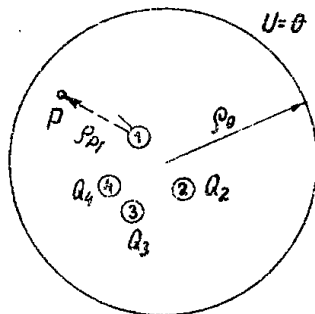
$$K = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \rho_0$$

$$U = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \frac{\rho_0}{\rho}$$

Přejdeme nyní k systému  $n$  vodičů o délkových hustotách nábojů  $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$  a zvolme obalový válec o poloměru  $\rho_0$  mnohem větším než jsou vzdálenosti mezi vodiči. Střed obalového válce je umístěn v těžišti obrazce rozmístění vodičů obr. 21. Potom pro jednotlivé vodiče můžeme použít vztah odvozený výše pro jeden vodič:

$$U = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \frac{\rho_0}{\rho}$$

Výsledný potenciál libovolného bodu  $P$  bude roven součtu potenciálů jednotlivých vodičů v tomto bodě:



Obr.34

$$U = \frac{Q_1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \frac{\rho_0}{\rho_{p1}} + \dots + \frac{Q_n}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \frac{\rho_0}{\rho_{pn}} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \sum_{k=1}^n Q_k \ln \frac{\rho_0}{\rho_{pk}}$$

Položme nyní bod  $P$  postupně na jednotlivé vodiče. Získáme potenciály jednotlivých vodičů jako lineární funkce nábojových hustot  $Q$ :

$$\begin{aligned}
U_1 &= \frac{Q_1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \frac{\rho_0}{\rho_{11}} + \dots + \frac{Q_k}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \frac{\rho_0}{\rho_{1k}} + \dots + \frac{Q_n}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \frac{\rho_0}{\rho_{1n}} \\
U_2 &= \frac{Q_1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \frac{\rho_0}{\rho_{21}} + \dots + \frac{Q_k}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \frac{\rho_0}{\rho_{2k}} + \dots + \frac{Q_n}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \frac{\rho_0}{\rho_{2n}} \\
&\vdots \\
U_n &= \frac{Q_1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \frac{\rho_0}{\rho_{n1}} + \dots + \frac{Q_k}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \frac{\rho_0}{\rho_{nk}} + \dots + \frac{Q_n}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \frac{\rho_0}{\rho_{nn}}
\end{aligned}$$

Zavedeme označení

$$\delta_{kn} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \frac{\rho_0}{\rho_{kn}}$$

a  $\delta_{kn}$  budeme nazývat potenciálový koeficient. Přitom  $\rho_{kn}$  označuje vzdálenost vodiče  $k$  od vodiče  $n$ .

$$U_1 = \delta_{11}Q_1 + \delta_{12}Q_2 + \dots + \delta_{1k}Q_k + \dots + \delta_{1n}Q_n$$

$$U_2 = \delta_{21}Q_1 + \delta_{22}Q_2 + \dots + \delta_{2k}Q_k + \dots + \delta_{2n}Q_n$$

$\vdots$

$$U_n = \delta_{n1}Q_1 + \delta_{n2}Q_2 + \dots + \delta_{nk}Q_k + \dots + \delta_{nn}Q_n$$

Obvykle jsou dána napětí a hledáme velikost nábojů. Potom řešením soustav  $n$  rovnic dostaneme

$$Q_1 = \gamma_{11}U_1 + \gamma_{12}U_2 + \dots + \gamma_{1k}U_k + \dots + \gamma_{1n}U_n$$

$$Q_2 = \gamma_{21}U_1 + \gamma_{22}U_2 + \dots + \gamma_{2k}U_k + \dots + \gamma_{2n}U_n$$

$\vdots$

$$Q_n = \gamma_{n1}U_1 + \gamma_{n2}U_2 + \dots + \gamma_{nk}U_k + \dots + \gamma_{nn}U_n$$

přičemž samozřejmě platí  $Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n + Q_0 = 0$ , čili obálka má náboj  $Q_0 = -Q_1 - Q_2 - \dots - Q_n$

Položíme-li  $U_2 = U_3 = \dots = U_n = 0$ , čili spojíme vodiče 2, 3, ..., n s obálkou, dostaneme

$$Q_1 = \gamma_{11}U_1 \quad \Rightarrow \quad \gamma_{11} = \frac{Q_1}{U_1}$$

Podobně provedeme pro vodič 2, 3, ..., n

$$Q_2 = \gamma_{22}U_2 \quad \Rightarrow \quad \gamma_{22} = \frac{Q_2}{U_2}$$

$$Q_n = \gamma_{nm} U_n \quad \Rightarrow \quad \gamma_{nm} = \frac{Q_n}{U_n}$$

Obecně tedy lze upravit na

$$\gamma_{nm} = \frac{Q_n}{U_n}$$

Je tedy  $\gamma_{nm}$  elektrostatickou kapacitou vodiče  $n$  na jednotku délky.

Koeficienty se stejnými indexy  $\gamma_{11}, \gamma_{22}, \dots, \gamma_{nn}$  jsou vždy kladné. Koeficienty s nestejnými indexy  $\gamma_{12}, \gamma_{13}, \dots, \gamma_{1n}, \dots$  jsou vždy záporné. Jsou to koeficienty elektrostatické indukce obecně vodiče  $k$  na vodič  $n$ . Pokud uvažujeme pouze absolutní hodnoty, pak jím říkáme dílčí kapacity vodiče  $k - n$ . Zavedeme-li místo potenciálů napětí mezi vodiči a mezi obálkou (tedy rozdíly potenciálu) dostaneme soustavu

$$\begin{aligned} Q_1 &= C_{10}U_1 + C_{12}(U_1 - U_2) + \dots + C_{1k}(U_1 - U_k) + \dots + C_{1n}(U_1 - U_n) \\ Q_2 &= C_{20}U_2 + C_{21}(U_2 - U_1) + \dots + C_{2k}(U_2 - U_k) + \dots + C_{2n}(U_2 - U_n) \\ &\vdots \\ Q_n &= C_{n0}U_n + C_{n1}(U_n - U_1) + \dots + C_{nk}(U_n - U_k) + \dots + C_{n,n-1}(U_n - U_{n-1}) \end{aligned}$$

Porovnáním s předchozí soustavou zjistíme

$$\begin{aligned} \gamma_{11} &= C_{10} + C_{12} + \dots + C_{1k} + \dots + C_{1n} \\ C_{12} &= -\gamma_{12}, \dots, C_{1n} = -\gamma_{1n} \quad \text{atd.} \end{aligned}$$

Potom platí, že

$$\begin{aligned} C_{10} &= \gamma_{11} + \gamma_{12} + \dots + \gamma_{1k} + \dots + \gamma_{1n} \\ C_{12} &= -\gamma_{12} \\ &\vdots \\ C_{1n} &= -\gamma_{1n} \end{aligned}$$

Všechny koeficienty jsou nyní kladné.

Přejdeme z  $n$  vodičového systému na systém 3 vodičový.

Dostaneme:

$$\begin{aligned} Q_1 &= C_{10}U_1 + C_{12}(U_1 - U_2) + C_{13}(U_1 - U_3) \\ Q_2 &= C_{20}U_2 + C_{21}(U_2 - U_1) + C_{23}(U_2 - U_3) \\ Q_3 &= C_{30}U_3 + C_{31}(U_3 - U_1) + C_{32}(U_3 - U_2) \end{aligned}$$

Položíme-li  $U_1 = U_2 = U_3$

$$\begin{aligned} \text{čili} \quad U_1 - U_2 &= 0 \\ U_1 - U_3 &= 0 \end{aligned}$$

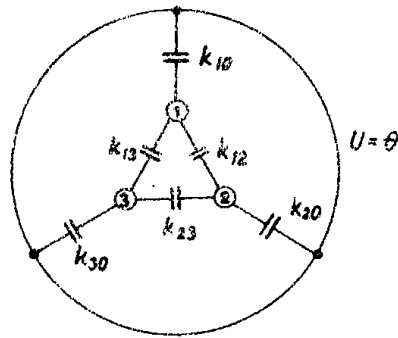
Dostaneme pro vodič 1

$$Q_1 = C_{10}U_1$$

a obdobně pro vodiče 2 a 3.

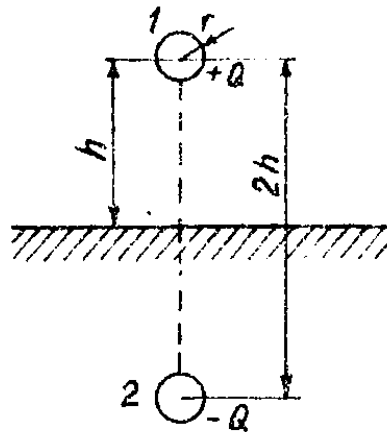
$C_{10}, C_{20}, C_{30}$  jsou dílčí kapacity vodičů 1, 2, 3 k obálce

$C_{12}, C_{13}, C_{23}$  jsou dílčí kapacity vodičů mezi sebou viz obr.35



Obr.35

Pro venkovní nadzemní vedení platí, že vodiče jsou rovnoběžné vzájemně i se zemí. Povrch země pokládáme za vodivý a jeho potenciál má být nulový. Na rozdíl od výše uvedeného předpokladu o situování obalového válce nemůžeme zem uvažovat jako potřebný obalový válec, protože je velmi blízko vodičům a její střed (jako válec) je v nekonečnu, ale podle předpokladu střed obalového válce má být v těžišti rozložení (obrazce) vodičů. Aby byl povrch země nulový, lze tento požadavek splnit principem zrcadlení Kelvina. Z elektrostatiky víme, že pole mezi vodičem a rovinou se nezmění, myslíme-li si je vytvořené dvěma paralelními vodiči z nichž jeden má délkovou hustotu náboje  $+Q$  a druhý, který je zrcadlovým obrazem prvního vzhledem k rovině má délkovou hustotu náboje  $-Q$ . Pro demonstraci principu předpokládejme jednovodičové vedení ve výšce  $h$  nad zemí a zem je vodičem zpětným podle obr.36



Obr.36

Pro metodu zrcadlení předpokládáme, že zem je odstraněna (není) a k vodiči 1 existuje vodič 2 (který tam ve skutečnosti není), který je zrcadlovým obrazem vodiče 1 vzhledem k zemi a má opačný náboj. Skutečné pole vodiče nad zemí, je pak dáno součtovým potenciálem skutečného a myšleného vodiče, zatím co ve spodní části pole není.

Dosaďme do vztahu

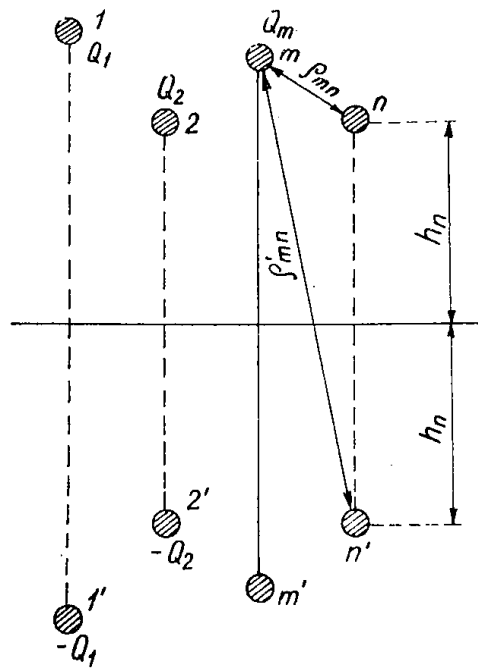
$$\delta_{mn} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \frac{\rho_0}{\rho_{mn}}$$

za poloměry  $\rho_{11}$ ,  $\rho_{22}$  dosadíme poloměr vodiče  $r$  a za vzájemnou vzdálenost  $\rho_{12}$  dosadíme vzdálenost  $2h$ . Pro vzduch je  $\epsilon_r = 1$ . Potom pro potenciál dostaneme

$$U_1 = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 \cdot 1} \ln \frac{\rho_0}{r} - \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 \cdot 1} \ln \frac{\rho_0}{2h} = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 \cdot 1} \ln \frac{2h}{r}$$

$$U_1 = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h}{r}$$

Metodu zrcadlení lze použít pro vícevodičové systémy. Soustavu skutečných vodičů a soustavu zrcadlových vodičů potom uvažujeme jako jeden systém vodičů uložený v obálce o velkém poloměru  $\rho_0$  viz obr.37



Obr.37

Jako v předchozím případě dosazením do vztahu pro potenciální koeficienty dostaneme pro vodič 1 :

$$U_1 = \frac{Q_1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \frac{\rho_0}{r_1} + \frac{Q_2}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \frac{\rho_0}{\rho_{12}} + \dots + \frac{Q_n}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \frac{\rho_0}{\rho_{1n}} - \frac{Q_1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \frac{\rho_0}{2h_1} - \frac{Q_2}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \frac{\rho_0}{\rho_{12}'} - \dots - \frac{Q_n}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \frac{\rho_0}{\rho_{1n}'}$$

Úpravou získáme:

$$U_1 = \frac{Q_1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \frac{2h_1}{r_1} + \frac{Q_2}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \frac{\rho_{12}'}{\rho_{12}} + \dots + \frac{Q_n}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \frac{\rho_{1n}'}{\rho_{1n}}$$

Obdobným postupem získáme potřebné vztahy i pro ostatní vodiče.

Potom můžeme získat vztahy pro potenciálové koeficienty se stejnými indexy

$$\delta_{nn} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \frac{2h_n}{r_n}$$

a s různými indexy:

$$\delta_{kn} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \frac{\rho_{kn}'}{\rho_{kn}}$$

a pomocí těchto koeficientů pak jsme schopni určit jednotlivé dílčí i provozní kapacity libovolného uspořádání.

Pro další potřebu konkrétního výpočtu upravíme získané potenciálové koeficienty.

Zavedeme označení  $K$ , ve kterém koeficient (2,3) plyne ze změny  $\ln$  na  $\log$ .

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ [F/m]} = 8,85 \cdot 10^{-6} \text{ [\mu F/m]} = 8,85 \cdot 10^{-3} \text{ [\mu F/km]}.$$

$$K = \frac{1,2,3}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} = \frac{2,3}{2\pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1} \text{ [m/F]};$$

Pro vzduch je  $\epsilon_r = 1$ . Po převodu na délku 1 km a změně označení vzdálenosti vodičů z  $\rho$  na  $d$  dostaneme

$$K = \frac{2,3}{2\pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-3}} = 41,4 \text{ [km/\mu F]}$$

Nebo

$$K = 41,4 \cdot 10^6 \text{ [km/F]}$$

$$\frac{1}{K} = 0,0242 \cdot 10^{-6} \text{ [F/km]}$$

Dosadíme  $K$  do potenciálových koeficientů a zavedeme nové označení pomocí velkého  $D$  místo  $\delta$ . Potom pro potenciálové koeficienty se stejnými indexy dostaneme:

$$D_{nn} = K \log \frac{2h_n}{r_n} = 41,4 \cdot 10^6 \log \frac{2h_n}{r_n} \text{ [km/F]}$$

a pro koeficienty s různými indexy:

$$D_{kn} = K \log \frac{d'_{kn}}{d_{kn}} = 41,4 \cdot 10^6 \log \frac{d'_{kn}}{d_{kn}} \text{ [km/F]}$$

Trojfázové vedení bez zemního lana (obecné uspořádání), netransponované:

$$U_1 = D_{11} \cdot Q_1 + D_{12} \cdot Q_2 + D_{13} \cdot Q_3$$

$$U_2 = D_{21} \cdot Q_1 + D_{22} \cdot Q_2 + D_{23} \cdot Q_3$$

$$U_3 = D_{31} \cdot Q_1 + D_{32} \cdot Q_2 + D_{33} \cdot Q_3$$

Řešením soustavy rovnic dostaneme:



$$Q_1 = \frac{\Delta_{Q1}}{\Delta} = \frac{U_1 D_{22} D_{33} + U_2 D_{32} D_{13} + U_3 D_{12} D_{23} - U_3 D_{22} D_{13} - U_1 D_{32} D_{23} - U_2 D_{12} D_{33}}{\Delta} =$$

$$= \frac{U_1 (D_{22} D_{33} - D_{32} D_{23}) - U_2 (D_{12} D_{33} - D_{32} D_{13}) + U_3 (D_{12} D_{23} - D_{22} D_{13})}{\Delta}$$

$$Q_1 = \frac{U_1 \Delta_{11} - U_2 \Delta_{21} + U_3 \Delta_{31}}{\Delta} = \frac{\Delta_{Q1}}{\Delta}$$

a stejným postupem

$$Q_2 = \frac{-U_1 \Delta_{12} + U_2 \Delta_{22} - U_3 \Delta_{32}}{\Delta} = \frac{\Delta_{Q2}}{\Delta}$$

$$Q_3 = \frac{U_1 \Delta_{13} - U_2 \Delta_{23} + U_3 \Delta_{33}}{\Delta} = \frac{\Delta_{Q3}}{\Delta}$$

Opět provedeme porovnání s vyjádřením stejné soustavy pomocí dílčích kapacit

$$Q_1 = C_{10} U_1 + C_{12}(U_1 - U_2) + C_{13}(U_1 - U_3)$$

$$Q_2 = C_{21}(U_2 - U_1) + C_{20} U_2 + C_{13}(U_2 - U_3)$$

$$Q_3 = C_{31}(U_3 - U_1) + C_{32}(U_3 - U_2) + C_{30} U_3$$

Po porovnání dostaneme:

$$C_{10} + C_{12} + C_{13} = \frac{\Delta_{11}}{\Delta} ; C_{12} = \frac{\Delta_{21}}{\Delta} ; C_{13} = \frac{-\Delta_{31}}{\Delta}$$

a tedy

$$C_{10} = \frac{\Delta_{11} - \Delta_{21} + \Delta_{31}}{\Delta}$$

Dále

$$C_{20} + C_{21} + C_{23} = \frac{\Delta_{22}}{\Delta} ; C_{21} = \frac{\Delta_{12}}{\Delta} ; C_{23} = \frac{\Delta_{32}}{\Delta}$$

a tedy

$$C_{20} = \frac{\Delta_{22} - \Delta_{12} - \Delta_{32}}{\Delta}$$

a poslední

$$C_{30} + C_{32} + C_{31} = \frac{\Delta_{33}}{\Delta} ; C_{31} = \frac{-\Delta_{13}}{\Delta} ; C_{32} = \frac{\Delta_{23}}{\Delta}$$

a tedy

$$C_{30} = \frac{\Delta_{33} + \Delta_{13} - \Delta_{23}}{\Delta}$$

Podobně jako tomu bylo u indukčnosti i zde používáme u venkovního vedení transpozici abychom vedení i kapacitně symetrizovali. U transponovaného vedení můžeme počítat se středními hodnotami potenciálových koeficientů.

$$D = \frac{1}{3}(D_{11} + D_{22} + D_{33}) \qquad D' = \frac{1}{3}(D_{12} + D_{13} + D_{23})$$

Označme

$$h_{stř} = \sqrt[3]{h_1 \cdot h_2 \cdot h_3} \quad - \text{střední výška vodičů nad zemí}$$

$$r_{stř} = \sqrt[3]{r_1 \cdot r_2 \cdot r_3} \quad - \text{střední poloměr vodičů}$$

$$d'_{stř} = \sqrt[3]{d'_{12} \cdot d'_{13} \cdot d'_{23}} \quad - \text{střední vzdálenost vodičů skutečných a zrcadlových obrazů vodičů druhých}$$

$$d_{stř} = \sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{13} \cdot d_{23}} \quad - \text{střední vzdálenost vodičů skutečných}$$

Potom bude

$$D = \frac{1}{3} 41,4 \cdot 10^6 \left( \log \frac{2h_1}{r_1} + \log \frac{2h_2}{r_2} + \log \frac{2h_3}{r_3} \right) = 41,4 \cdot 10^6 \log \frac{2 \cdot \sqrt[3]{h_1 \cdot h_2 \cdot h_3}}{\sqrt[3]{r_1 \cdot r_2 \cdot r_3}} = 41,4 \cdot 10^6 \log \frac{2 \cdot h_{stř}}{r_{stř}}$$

$$D' = \frac{1}{3} 41,4 \cdot 10^6 \left( \log \frac{d'_{12}}{d_{12}} + \log \frac{d'_{13}}{d_{13}} + \log \frac{d'_{23}}{d_{23}} \right) = 41,4 \cdot 10^6 \log \frac{\sqrt[3]{d'_{12} \cdot d'_{13} \cdot d'_{23}}}{\sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{13} \cdot d_{23}}} = 41,4 \cdot 10^6 \log \frac{d'_{stř}}{d_{stř}} =$$

$$= 41,4 \cdot 10^6 \log \frac{\sqrt{(2h_{stř})^2 + d_{stř}^2}}{d_{stř}}$$

Původní soustava rovnic dostane tvar:

$$U_1 = D \cdot Q_1 + D' \cdot Q_2 + D' \cdot Q_3$$

$$U_2 = D' \cdot Q_1 + D \cdot Q_2 + D' \cdot Q_3$$

$$U_3 = D' \cdot Q_1 + D' \cdot Q_2 + D \cdot Q_3$$

Její řešení bude:

$$Q_1 = \frac{\Delta_{Q1}}{\Delta} \quad ; \quad Q_2 = \frac{\Delta_{Q2}}{\Delta} \quad ; \quad Q_3 = \frac{\Delta_{Q3}}{\Delta}$$

Příčemž je

$$\Delta = (D - D')^2 \cdot (D + 2D')$$

$$\Delta_{Q1} = (D^2 - D'^2) U_1 - D'(D - D') U_2 + D'(D' - D) U_3$$

a obdobně pro  $\Delta_{Q2}$  a  $\Delta_{Q3}$

Provedeme opět vyjádření soustavy rovnic pomocí dílčích kapacit.

$$Q_1 = C_{10}U_1 + C_{12}(U_1 - U_2) + C_{13}(U_1 - U_3) = (C_{10} + C_{12} + C_{13})U_1 - C_{12}U_2 - C_{13}U_3$$

$$Q_2 = C_{20}U_2 + C_{21}(U_2 - U_1) + C_{23}(U_2 - U_3) = (C_{20} + C_{21} + C_{23})U_2 - C_{21}U_1 - C_{23}U_3$$

$$Q_3 = C_{30}U_3 + C_{31}(U_3 - U_1) + C_{32}(U_3 - U_2) = (C_{30} + C_{31} + C_{32})U_3 - C_{31}U_1 - C_{32}U_2$$

čili po úpravě:

$$Q_1 = (C_{10} + C_{12} + C_{13}) U_1 - C_{12}U_2 - C_{13}U_3$$

$$Q_2 = -C_{21}U_1 + (C_{20} + C_{21} + C_{23})U_2 - C_{23}U_3$$

$$Q_3 = -C_{31}U_1 - C_{32}U_2 + (C_{30} + C_{31} + C_{32})U_3$$

Porovnáním soustavy rovnic s potenciálními koeficienty a rovnic s dílčími kapacitami dostaneme:

$$\frac{(D+D')}{(D+2D')(D-D')} U_1 - \frac{D'}{(D+2D')(D-D')} U_2 - \frac{D'}{(D+2D')(D-D')} U_3 = (C_{10} + C_{12} + C_{13})U_1 - C_{12}U_2 - C_{13}U_3$$

a tedy:

$$C_{10} + C_{12} + C_{13} = \frac{D+D'}{(D+2D')(D-D')} ; C_{12} = \frac{D'}{(D+2D')(D-D')} = C_{13} = C'$$

$$C_{10} = \frac{D+D'}{(D+2D')(D-D')} - \frac{2D'}{(D+2D')(D-D')} = \frac{1}{(D+2D')} = C_{20} = C_{30} = C_0$$

(z důvodu transpozice)

Pro bezporuchový provoz platí, že okamžité potenciály jednotlivých vodičů jsou dány okamžitými hodnotami  $u_1, u_2, u_3$  fázových napětí  $U_1, U_2, U_3$ , pro něž platí

$$u_1 + u_2 + u_3 = 0$$

Okamžitý náboj vodiče 1 bude

$$q_1 = C_0 u_1 + C'(u_1 - u_2) + C'(u_1 - u_3) = (C_0 + 2C')u_1 - C'(u_2 + u_3) = (C_0 + 3C')u_1$$

Provozní kapacita je poměr náboje ku jeho potenciálu

$$C_p = \frac{q_1}{u_1} = C_0 + 3C'$$

Po dosazení  $C_0$  a  $C'$  a po úpravě dostaneme

$$C_p = \frac{1}{(D - D')}$$

Pro transponované vedení jsme dostali pro potenciálové koeficienty:

$$D = 41,4 \cdot 10^6 \log \frac{2 \cdot h_{stř}}{r_{stř}}$$

$$D' = 41,4 \cdot 10^6 \log \frac{\sqrt{(2h_{stř})^2 + d_{stř}^2}}{d_{stř}}$$

Pro dílčí kapacitu proti zemi

$$C_0 = \frac{1}{(D + 2D')}$$

Pro dílčí kapacitu mezi vodiči

$$C' = \frac{D'}{(D + 2D')(D - D')}$$

Pro provozní kapacitu vedení

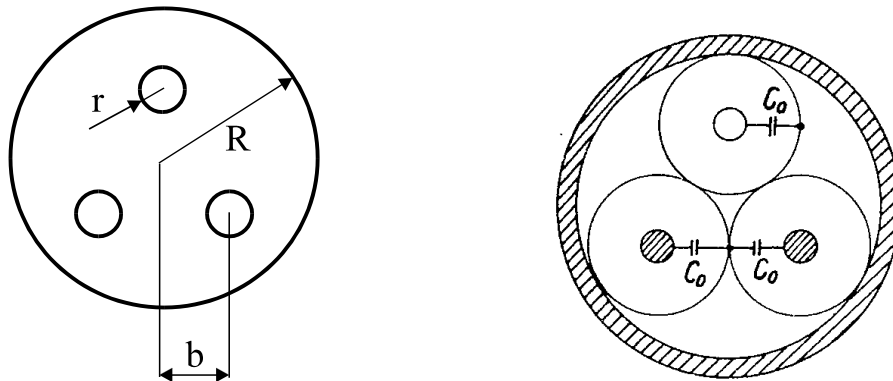
$$C_p = \frac{1}{(D - D')}$$

### Parametry kabelových vedení

Typy kabelů:

- jednožilové s kovovým pláštěm, nebo vícežilové s kovovým pláštěm pro každý vodič (stíněné žíly) obr. 38
- trojžilové s kovovým pláštěm společným pro všechny tři vodiče (plášťové stínění) obr. 39
- celoplastové kabely

ad a)



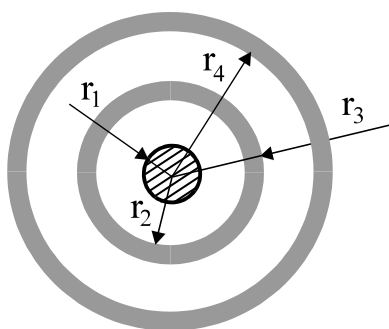
Obr.38

$L_p$  - nebudeme odvozovat, počítá se stejně jako u dvouvodičového vedení. Lze dokázat,

že stínění nemá vliv na provozní indukčnost

$$C_p = C_0 = \frac{0,0242 \cdot \epsilon_r}{\log \frac{r_2}{r_1}} ; \quad r_2 = \frac{r_2' + r_2''}{2} \text{ - střední poloměr kovového pláště.}$$

Ad b)

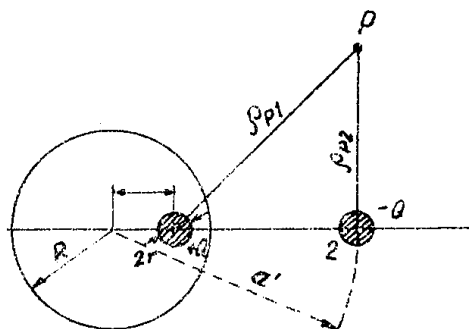


Obr.39

Provozní indukčnost u trojžilových kabelů se počítá stejně jako u transponovaného vedení

$$L_p = 0,46 \log \frac{d_s}{r} + 0,05 \text{ [mH/km]}$$

Pro výpočet provozní kapacity kabelů nemůžeme použít Kelvinovu metodu zrcadlení. Zde platí zrcadlení na válcovou kovovou plochu (válcový plášť kabelu) podle obr. 40



Obr. 40

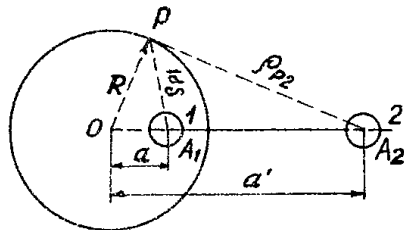
Pro tuto soustavu vodičů 1 a 2 použijeme dříve odvozené vztahy pro kapacitu podle obr.34. Zde opět bude mít obalový válec poloměr  $\rho_0$  dostatečně veliký. Můžeme tedy použít odvozených vztahů pro potenciál v bodě P:

$$U_p = \frac{1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \sum_{k=1}^n Q_k \ln \frac{\rho_0}{\rho_{pk}}$$

Pro bod P platí tedy:

$$U_p = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \frac{\rho_0}{\rho_{p1}} - \frac{Q}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \frac{\rho_0}{\rho_{p2}} = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \frac{\rho_{p2}}{\rho_{p1}}$$

Ekvipotenciální plochy ( $U_p = \text{konst}$ ) jsou tedy válce, které obklopují vodiče 1 a 2 excentricky. Protože olovený (kovový) plášť má mít konstantní potenciál, znamená to, že musí být ekvipotenciální plochou. Zvolíme na oloveném plášti náš bod P podle obr.41



Obr.41

Z obr.41 vidíme, že trojúhelníky  $POA_1$  a  $POA_2$  jsou si podobné, protože mají v bodě O společný úhel, společnou stranu R a jsou dále vázány podmínkou, že poměr  $\frac{\rho_{p2}}{\rho_{p1}} = \text{konst.}$  protože podle předpokladu má mít kovový plášť konstantní potenciál. Platí tedy:

$$\frac{\overline{A_2O}}{\overline{OP}} = \frac{\overline{OP}}{\overline{A_1O}} \quad \text{nebo-li} \quad \frac{a'}{R} = \frac{R}{a}$$

z toho  $a' = \frac{R^2}{a}$

čímž jsme určili vzdálenost zrcadlového náboje  $-Q$ . Pro všechny body kovového pláště (kružnice) platí:

$$\frac{A_2O}{A_2P} = \frac{R^2}{a \rho_{p2}}, \quad \frac{PO}{A_1P} = \frac{R}{\rho_{p1}}$$

a pro podobné trojúhelníky platí:

$$\frac{\frac{R^2}{a}}{\rho_{p2}} = \frac{R}{\rho_{p1}} \quad \text{a tedy} \quad \frac{R}{a} = \frac{\rho_{p2}}{\rho_{p1}}$$

Je tedy potenciál kovového pláště konstantní a má hodnotu

$$U_{pl} = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \frac{R}{a}$$

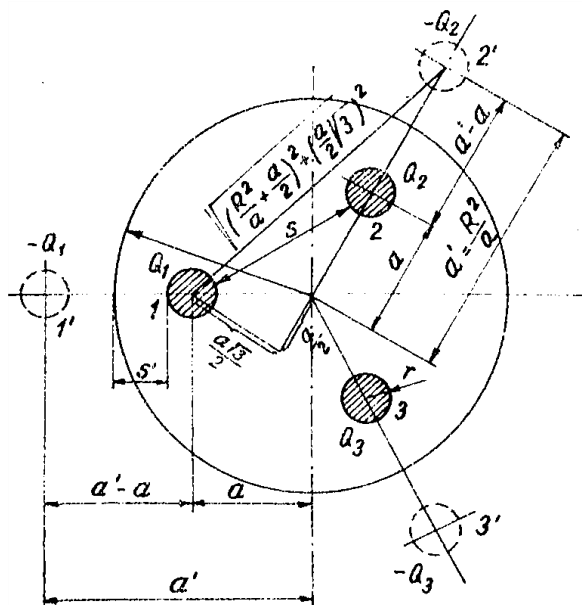
Rozdíl potenciálů nebo-li napětí libovolného bodu P vzhledem k olovenému plášti je:

$$U_p - U_{pl} = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \left( \ln \frac{\rho_{p2}}{\rho_{p1}} - \ln \frac{R}{a} \right)$$

Položíme-li potenciál pláště  $U_{pl}$  rovný nule a uvažujeme-li bod P na povrchu vodiče, pak je to současně potenciál vodiče  $A_1$ . Potom ovšem je vně pláště pole rovno nule a uvnitř pláště je dáno potenciálem  $U_p$ .

Na základě tohoto postupu můžeme počítat potenciály i více vodičových kabelů.

Jako příklad provedeme výpočet třívodičového kabelu podle obr.42



Obr.42

Myšlený bod P položíme na vodič 1. Na potenciál bodu P budou mít vliv všechny náboje a sice tři skutečné  $Q_1, Q_2, Q_3$  a tři zrcadlové  $-Q_1, -Q_2, -Q_3$ . Potenciál bodu P na vodiči 1 bude od náboje  $+Q_1$  a  $-Q_1$   $U_{p11}$  podle výše odvozeného vztahu pro jednovodičový kabel.

$$U_{p11} = \frac{Q_1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \left( \ln \frac{\rho_{11}}{\rho_{11}} - \ln \frac{R}{a} \right)$$

Přičemž

$$\rho_{11} = a' - a = \frac{R^2}{a} - a = R \left( \frac{R}{a} - \frac{a}{R} \right)$$

$$\rho_{11} = r$$

a dále určíme :  $\rho_{12} = \rho_{13} = a\sqrt{3}$

$$\rho_{12} = \rho_{13} = \sqrt{\left(\frac{R^2}{a} + \frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{a}{2}\sqrt{3}\right)^2} = R \sqrt{\frac{R^2}{a^2} + 1 + \frac{a}{R}}$$

Potom bude potenciál vodiče  $U_{p11}$  od náboje  $+Q_1$  a  $-Q_1$ :

$$U_{p11} = \frac{Q_1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \left( \ln \frac{R(\frac{R}{a} - \frac{a}{R})}{\rho_{11}} - \ln \frac{R}{a} \right) = \frac{Q_1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \frac{R^2 - a^2}{R.r} = D_{11} \cdot Q_1$$

Podobně bude potenciál vodiče 1 od náboje  $+Q_2$  a  $-Q_2$ :

$$U_{p12} = \frac{Q_2}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \left( \ln \frac{R(\sqrt{1 + \frac{R^2}{a^2} + \frac{a^2}{R^2}})}{a\sqrt{3}} - \ln \frac{R}{a} \right) = \frac{Q_2}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \sqrt{\frac{1}{3} \left( 1 + \frac{R^2}{a^2} + \frac{a^2}{R^2} \right)} = D_{12} \cdot Q_2$$

A podobně i pro náboj  $+Q_3$  a  $-Q_3$ :

$$U_{p13} = \frac{Q_3}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \sqrt{\frac{1}{3} \left( 1 + \frac{R^2}{a^2} + \frac{a^2}{R^2} \right)} = D_{13} \cdot Q_3$$

Celkový potenciál vodiče 1,  $U_{p1}$  bude:

$$U_{p1} = U_{p11} + U_{p12} + U_{p13} = D_{11} \cdot Q_1 + D_{12} \cdot Q_2 + D_{13} \cdot Q_3$$

Protože všechny tři vodiče jsou v kabelu uspořádány souměrně vzhledem k olověnému plášti, je patrné, že potenciály druhých vodičů budou mít tytéž hodnoty.

Platí tedy:

$$D_{11} = D_{22} = D_{33} = D ; D_{12} = D_{13} = D_{23} = D'$$

$$D = \frac{1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \frac{R^2 - a^2}{R.r} ; D' = \frac{1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \sqrt{\frac{1}{3} \left( 1 + \frac{R^2}{a^2} + \frac{a^2}{R^2} \right)}$$

$$D = \frac{41,4 \cdot 10^6}{\epsilon_r} \log \frac{R^2 - a^2}{R.r} \quad [\text{km/F}] ; D' = \frac{41,4 \cdot 10^6}{\epsilon_r} \log \sqrt{\frac{1}{3} \left( 1 + \frac{R^2}{a^2} + \frac{a^2}{R^2} \right)} \quad [\text{km/F}]$$

Dále postupujeme jako u venkovního vedení. Proto dojdeme ke vztahům pro kapacity:

$$C_p = \frac{1}{(D - D')} \quad (\text{F/km}) ; C_0 = \frac{1}{(D + 2D')} \quad (\text{F/km}) ; C' = \frac{D'}{(D + 2D')(D - D')} \quad (\text{F/km})$$

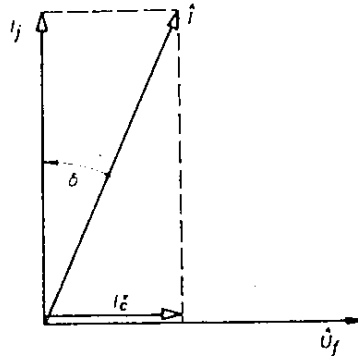
$$C_p = (C_0 + 3C')$$

Ad c) kabely celoplastové (nestíněné)

Jednotlivé kapacity jsou ovlivněny prostředím (písek, zemina). Výsledky získáme měřením.

Dielektrické ztráty kabelu





Obr.43

Připojíme-li kabel na napětí zjistíme, že jím protéká určitý proud. Ten je způsoben jednak nedokonalostí izolace a jednak velikostí kapacity provozní podle obr. 43. Pro trojfázové dielektrické ztráty můžeme psát:

$$P_d = 3 \cdot U_f \cdot I_\epsilon = 3U_f \cdot I_j \cdot \text{tg}\delta = 3 \cdot U_f \cdot U_f \cdot \omega \cdot C_p \cdot \text{tg}\delta = U_s^2 \cdot \omega \cdot C_p \cdot \text{tg}\delta = Q_c \cdot \text{tg}\delta$$

kde  $Q_c$  jsme označili nabíjecí výkon vedení [VAr/km]

$C_p$  je provozní kapacita kabelu [F/km]

Kabel  $3 \times 150 \text{ mm}^2$  pro 35 kV,  $I_n = 300 \text{ A}$ .

$$C_p = 0,2 \quad [\mu\text{F}/\text{km}]$$

$$C_0 = 0,1 \quad [\mu\text{F}/\text{km}]$$

$$C' = 0,033 \quad [\mu\text{F}/\text{km}]$$

3 fázové vedení  $3 \times 150 \text{ mm}^2$ ; 150 kV netransponované horizontální

$$C_{p1} = C_{p3} = 6,05 \cdot 10^{-3} \quad [\mu\text{F}/\text{km}]$$

$$C_{p2} = 5,49 \cdot 10^{-3} \quad [\mu\text{F}/\text{km}]$$

transponované horizontální

$$C_p = 0,0088 \quad [\mu\text{F}/\text{km}]$$

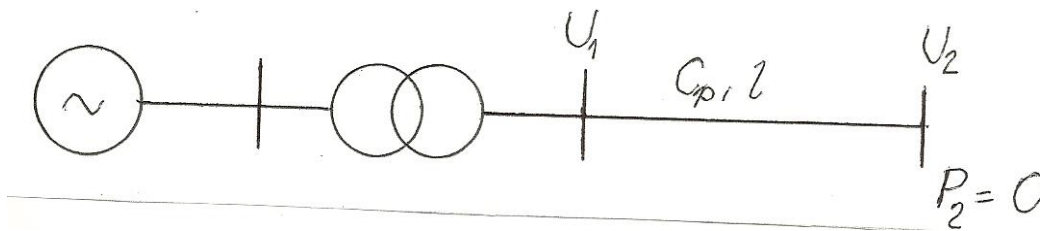
$$C = 0,0059 \quad [\mu\text{F}/\text{km}]$$

$$C = 0,097 \quad [\mu\text{F}/\text{km}]$$

## NABÍJECÍ PROUD a VÝKON DO VEDENÍ

V bezporuchovém stavu

Na obr.44 je vidět nejjednodušší případ vedení, reprezentovaného parametry  $C_p$ , 1



Obr.44

Nabíjecí proud jedné fáze:

$$I_c = U_f \cdot \omega \cdot C_p \cdot l \quad [\text{A}; \text{V}; \text{rad/s}; \quad [\text{F/km}; \text{km}]$$

Nabíjecí výkon jedné fáze:

$$Q_c = U_f \cdot I_c = U_f \cdot U_f \cdot \omega \cdot C_p \cdot l = U_f^2 \cdot \omega \cdot C_p \cdot l \quad [\text{VAr}; \text{V}; \text{rad/s}; \text{F/km}; \text{km}]$$

Trojfázový nabíjecí výkon:

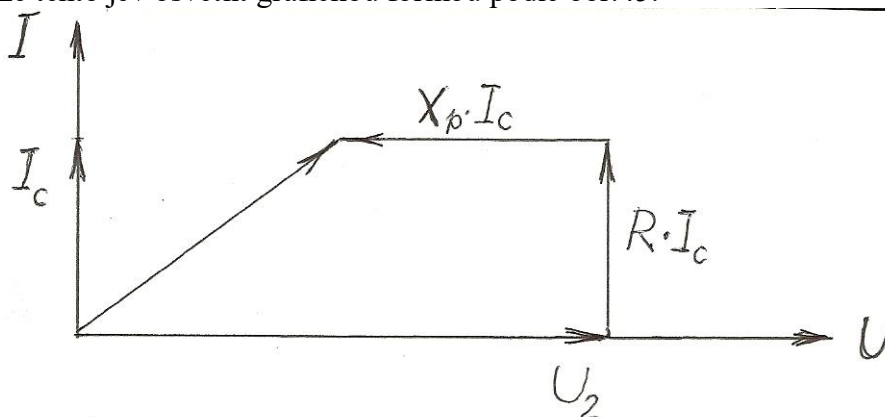
$$Q_c = 3 \cdot U_f \cdot I_c = 3 \cdot U_f^2 \cdot \omega \cdot C_p \cdot l = U_s^2 \cdot \omega \cdot C_p \cdot l \quad [\text{MVA}; \text{kV}; \text{rad/s}; \text{F/km}; \text{km}]$$

Ferantiho jev:

Nastává na vedení tehdy, je-li přinášený výkon menší než je tzv. přirozený výkon vedení.

V krajním případě je vedení v tzv. stavu naprázdno tj.  $P_2 = 0$ .

Nejlépe lze tento jev osvětlit grafickou formou podle obr.45.



Obr.45

Je vidět, že  $U_{1f} < U_{2f}$

Vlnová impedance a přirozený výkon vedení:

Známe pasivní parametry vedení:  $R, G, L_p, C_p$

Vztah:

$$Z_{vl} = \sqrt{\frac{R + jX_p}{G + jB_p}} \quad [ \Omega ] \quad X_p = \omega \cdot L_p ; B_p = \omega \cdot C_p$$

Nazýváme vlnovou impedancí vedení s danými parametry. Pro bezztrátové vedení platí:

$$R = 0 ; G = 0$$

Potom vlnová impedance bude:

$$Z_{vl} = \sqrt{\frac{jX_p}{jB_p}} \cong \sqrt{\frac{L_p}{C_p}} \quad [ \Omega ] \quad \text{Pro 400 kV je } Z_{vl} \cong 266 \quad [ \Omega ]$$

$$S_p = 3 \cdot U_f \cdot \frac{U_f}{Z_{vl}} = 3 \cdot \frac{U_f^2}{Z_{vl}} = \frac{3}{(\sqrt{3})^2} \cdot \frac{U_s^2}{Z_{vl}} = \frac{U_s^2}{Z_{vl}} \quad [ \text{MW} ] \quad \text{Pro 400 kV je } S_p \cong 600 \quad [ \text{MW} ]$$

## VEDENÍ A SÍŤ V USTÁLENÉM CHODU

Elektrická vedení a sítě umožňují v elektrizační soustavě přenos elektrické energie z výroben a její rozvod až k elektrickým spotřebičům. Vedení tvoří tedy velmi důležitou část elektrizační soustavy. Elektrické vedení musí proto vyhovovat řadě podmínek:

### 1) Ztráta výkonu:

Při průchodu proudu vodičem se vytváří teplo, které se v elektrickém rozvodu odvádí do okolního prostředí a tím dochází ke vzniku ztrát energie, výkonu. Tyto ztráty jsou závislé na průřezu a materiálu vodiče a na velikosti procházejícího proudu, tedy na zatížení. Ztráty výkonu jsou rozdílem mezi výkonem na výstupu z elektrárny a výkonem odebraným spotřebiteli. Požadujeme, aby tyto ztráty byly co nejmenší, ale při únosné ceně vodiče. Tento problém vede k pojmu hospodárný průřez.

### 2) Úbytek napětí:

Při odchylkách provozního napětí od napětí jmenovitého může docházet ke změně životnosti spotřebiče (žárovky), nebo k narušení správné funkce (asynchronní motory) a dále se mění účinnost zřízení. Toto hledisko je velmi důležité zejména v těch místech elektrického rozvodu, kde není provedena regulace napětí.

### 3) Oteplení vodičů procházejícím proudem:

Pro každý typ vodiče a způsob jeho uložení je určena jeho trvalá provozní teplota a tím i jeho trvalé zatížení určitým proudem.

### 4) Odolnost proti účinkům zkratových proudů:

Zkratové proudy způsobují jednak oteplení vodičů a dále pak vyvozují na vodiče a jejich uložení silové účinky.

### 5) Mechanická odolnost

Zejména venkovní vedení musí odolávat vlivům povětrnosti (vítr, námraza, změna délky vodičů v závislosti na teplotě okolí apod.)

#### 6) Jistota dodávky

Elektrické vedení musí být provedena tak, aby výpadky dodávky elektrické energie byly co nejmenší, omezení dodávky při poruchách bylo co nejkratší a životnost vedení byla úměrná účelu a podmínkám zařízení. Tyto požadavky musí být v souladu s ekonomickým množstvím prostředků vynaložených na výstavbu, provoz a údržbu zařízení.

#### 7) Bezpečnost zařízení a osob

Umístění, provedení a zajištění elektrického rozvodu a přenosu musí vyhovovat řadě předpisů – úraz, požár, výbuch.

#### 8) Vliv na životní prostředí

Vyžaduje se vhodné umístění elektrického rozvodu a přenosu s ohledem na estetiku i na účinky ve svém okolí.

#### 9) Unifikace

Je to důležité hledisko pro provoz a údržbu v souvislosti s počtem náhradních dílů a zařízení.

Elektrická vedení a sítě se nejčastěji provozují jako:

#### 1) Paprsková síť

Je to soustava vedení napájených z jednoho místa (jednostranné napájení odběrů).

#### 2) Okružní síť

Skládá se z okružních vedení, jejichž oba konce jsou připojeny na totéž napájecí místo, takže každý odběr je napájen ze dvou stran a má zajištěnou zvýšenou bezpečnost dodávky elektrické energie. Obě tyto sítě označujeme často pojmem jednoduchá vedení.

#### 3) Uzlová síť (mřížová)

Zajišťuje nepřetržitý provoz a zvyšuje bezpečnost dodávky, protože každý odběr se může napájet z několika stran.

Podle proudové soustavy dělíme elektrické vedení a sítě na:

#### 1) stejnosměrné

#### 2) střídavé

Podle velikosti napětí je rozdělujeme na vedení a sítě:

- 1) mn - malé napětí
- 2) nn - nízké napětí
- 3) vn - vysoké napětí
- 4) vvn - velmi vysoké napětí
- 5) zvn - zvláště vysoké napětí
- 6) uvn - ultra vysoké napětí

## PROBLEMATIKA VÝKONU VE STŘÍDAVÝCH SÍTÍCH

Ve střídavých sítích používáme těchto výkonů:

Jednofázový činný	$P_f = U_f \cdot I \cdot \cos \varphi$	[ W ; V ; A ]
Trojfázový činný	$P = 3 \cdot U_f \cdot I \cdot \cos \varphi$	
	$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$	[ W ; V ; A ]
Jednofázový jalový	$Q_f = U_f \cdot I \cdot \sin \varphi$	[ VAr, V , A ]
Trojfázový jalový	$Q = 3 \cdot U_f \cdot I \cdot \sin \varphi$	
	$Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi$	[ VAr, V , A ]
Jednofázový zdánlivý	$S_f = U_f \cdot I$	
	$S_f = \sqrt{P_f^2 + Q_f^2}$	[ VA , W, VAr ]
Trojfázový zdánlivý	$S = 3 \cdot U_f \cdot I = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$	[ VA, V, A ]
	$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$	[ VA , W, VAr ]

$$\text{Komplexní jednofázový} \quad \bar{S}_f = P_f \pm jQ_f = U_f \cdot I (\cos \varphi \pm j \sin \varphi) = S_f \cdot e^{\pm j\varphi}$$

Časový průběh střídavého napětí a proudu je:

$$u = U_m \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_u) = U_m \cdot \operatorname{Re} [ e^{j(\omega \cdot t + \varphi_u)} ]$$

$$i = I_m \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_i) = I_m \cdot \operatorname{Re} [ e^{j(\omega \cdot t + \varphi_i)} ]$$

Do těchto vztahů zavedeme efektivní hodnoty proudu a napětí

$$I_m = \sqrt{2} \cdot I \quad ; \quad U_m = \sqrt{2} \cdot U_f$$

$$u = \operatorname{Re} [ \sqrt{2} \cdot U_f e^{j(\omega \cdot t + \varphi_u)} ] = \operatorname{Re} [ \sqrt{2} \cdot U_f \cdot e^{j\omega \cdot t} \cdot e^{j\varphi_u} ] = \operatorname{Re} [ \sqrt{2} \bar{U}_f \cdot e^{j\omega \cdot t} ]$$

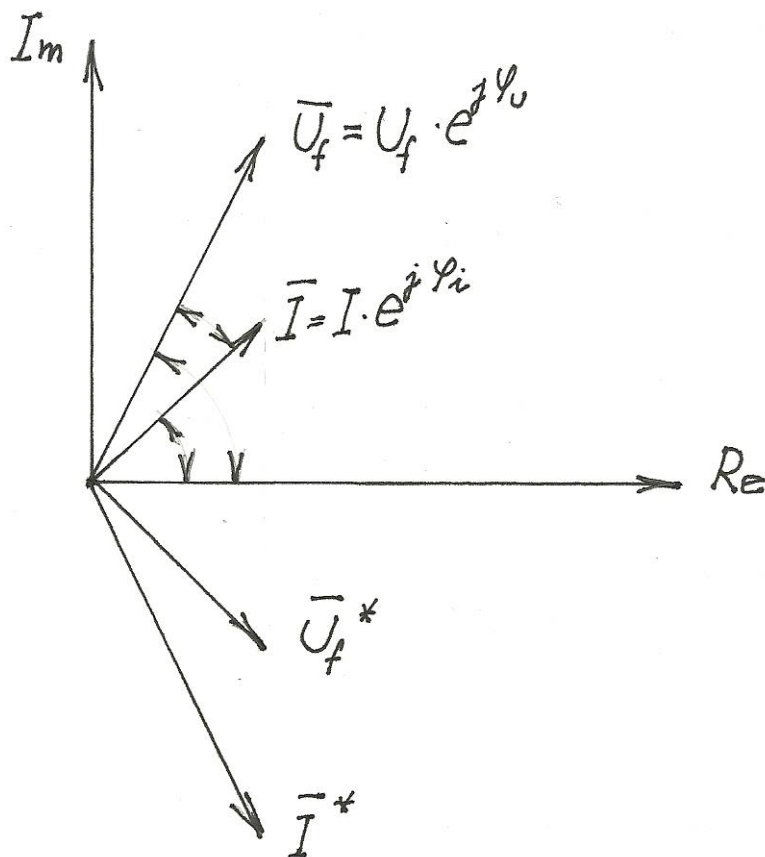
$$i = \operatorname{Re} [ \sqrt{2} \cdot I e^{j(\omega \cdot t + \varphi_i)} ] = \operatorname{Re} [ \sqrt{2} \cdot I \cdot e^{j\omega \cdot t} \cdot e^{j\varphi_i} ] = \operatorname{Re} [ \sqrt{2} \bar{I} \cdot e^{j\omega \cdot t} ]$$

V těchto rovnicích jsou zavedeny fázory napětí a proudu.

$$\bar{U}_f = U_f \cdot e^{j\varphi_u}$$

$$\bar{I} = I \cdot e^{j\varphi_i}$$

Ty znázorníme v komplexní rovině obr.46



Obr.46

Zde je uvedeno induktivní zatížení, kdy fázor proudu je zpožděn za fázorem napětí o úhel  $\varphi$ .  
Dále můžeme definovat komplexně sdružené fázory:

$$\overline{U}_f^* = U_f \cdot e^{-j\varphi_u} \quad ; \quad \overline{I}^* = I \cdot e^{-j\varphi_i}$$

Potom lze komplexní jednofázový výkon vyjádřit dvěma způsoby:

$$a) \quad \overline{S}_f = \overline{U}_f^* \cdot \overline{I} = U_f \cdot I \cdot e^{j(-\varphi_u + \varphi_i)} = U_f \cdot I \cdot e^{-j(\varphi_u - \varphi_i)}$$

Pro induktivní zátěž na obr. 38 plyne  $\varphi = \varphi_u - \varphi_i$  takže

$$\overline{S}_f = U_f \cdot I \cdot e^{-j\varphi} = P_f - j Q_f$$

Vidíme, že znaménko  $-$  v tomto případě znamená induktivní zatížení

$$b) \quad \overline{S}_f = \overline{U}_f \cdot \overline{I}^* = U_f \cdot I \cdot e^{j(\varphi_u - \varphi_i)}$$

zde opět  $\varphi = \varphi_u - \varphi_i$  pro induktivní zátěž.

$$\overline{S}_f = U_f \cdot I \cdot e^{+j\varphi} = P_f + j Q_f$$

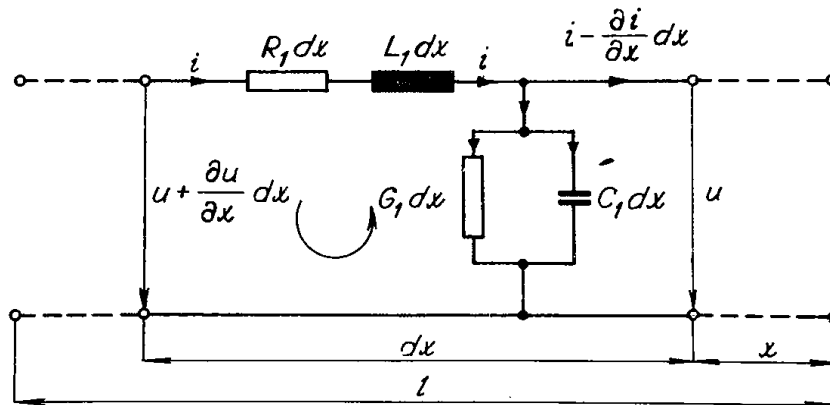
Vidíme, že zde znaménko + znamená induktivní zatížení. Při výpočtech lze volit jeden nebo druhý způsob pro komplexní výkon, ale je nutno v celém výpočtu dodržet zvolený způsob.

## TROJFÁZOVÁ VEDENÍ $v_{vn}$ , $z_{vn}$

Účelem trojfázových vedení nejvyšších napětí je přenos velkého množství elektrické energie obvykle na velké vzdálenosti (celostátní elektrická soustava nebo mezinárodní spolupráce). U těchto vedení se zaměřujeme především na stanovení poměrů na jednom konci přenosu při zadaných poměrech na druhém konci. Tím získáme podklady pro určení ztrát činného výkonu a stanovení účinnosti přenosu.

Řešení dlouhých přenosových vedení se provádí při uvažování všech čtyř základních parametrů tj.  $R$ ,  $L$ ,  $G$ ,  $C$ . Uvedené parametry jsou rovnoměrně rozloženy podél celé délky vedení. Takové vedení nazýváme rovněž homogenním vedením.

Vezměme element takového vedení o délce  $dx$ , který je vzdálen od konce vedení o  $x$  jak je uvedeno na obr.47.



Obr.47

Parametry jsou udány na jednotku délky 1 km. Potom podle 2. K.z. platí pro napětí

$$u + \frac{\partial u}{\partial x} \cdot dx - u - R \cdot dx \cdot i - L dx \cdot \frac{\partial i}{\partial t} = 0$$

a z toho pro změnu napětí na délce elementu  $dx$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = R \cdot i + L \cdot \frac{\partial i}{\partial t}$$

Podle 1.K.z. pro proud v uzlu platí:

$$i - (i - \frac{\partial i}{\partial x} \cdot dx) - G \cdot dx \cdot u - C \cdot dx \cdot \frac{\partial u}{\partial t} = 0$$

a z toho změna proudu v elementu  $dx$

$$\frac{\partial i}{\partial x} = G \cdot u + C \cdot \frac{\partial u}{\partial t}$$

Do rovnic pro napětí a proud dosadíme střídavé napětí a proud podle vztahů:

$$u = U_m \cdot \cos(\omega.t + \varphi_u) = U_m \cdot \operatorname{Re} [e^{j(\omega.t + \varphi_u)}] = \sqrt{2} \cdot U_f \cdot \operatorname{Re} [e^{j(\omega.t + \varphi_u)}] = \operatorname{Re} [\sqrt{2} \cdot \overline{U}_f \cdot e^{j\omega.t}]$$

$$i = I_m \cdot \cos(\omega.t + \varphi_i) = I_m \cdot \operatorname{Re} [e^{j(\omega.t + \varphi_i)}] = \sqrt{2} \cdot I \cdot \operatorname{Re} [e^{j(\omega.t + \varphi_i)}] = \operatorname{Re} [\sqrt{2} \cdot \overline{I} \cdot e^{j\omega.t}]$$

Potřebné derivace budou

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \sqrt{2} \cdot \operatorname{Re} \left[ \frac{d\overline{U}_f}{dx} \cdot e^{j\omega.t} \right] \qquad \frac{\partial i}{\partial x} = \sqrt{2} \cdot \operatorname{Re} \left[ \frac{d\overline{I}}{dx} \cdot e^{j\omega.t} \right]$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \sqrt{2} \cdot \operatorname{Re} [j\omega \cdot \overline{U}_f \cdot e^{j\omega.t}] \qquad \frac{\partial i}{\partial t} = \sqrt{2} \cdot \operatorname{Re} [j\omega \cdot \overline{I} \cdot e^{j\omega.t}]$$

Po dosazení a patřičné úpravě bude

$$\sqrt{2} \cdot \operatorname{Re} \left[ \frac{d\overline{U}_f}{dx} \cdot e^{j\omega.t} \right] = \operatorname{Re} [\sqrt{2} \cdot \overline{I} \cdot e^{j\omega.t}] + L \cdot \sqrt{2} \cdot \operatorname{Re} [j\omega \cdot \overline{I} \cdot e^{j\omega.t}]$$

$$\sqrt{2} \cdot \frac{d\overline{U}_f}{dx} \cdot \operatorname{Re} [e^{j\omega.t}] = \sqrt{2} \cdot R \cdot \overline{I} \cdot \operatorname{Re} [e^{j\omega.t}] + \sqrt{2} \cdot L \cdot j\omega \cdot \overline{I} \operatorname{Re} [e^{j\omega.t}]$$

$$\frac{d\overline{U}_f}{dx} = (R + j\omega \cdot L) \cdot \overline{I} = \overline{Z}_l \cdot \overline{I}$$

a obdobně pro proud:

$$\frac{d\overline{I}}{dx} = (G + j\omega \cdot C) \cdot \overline{U}_f = \overline{Y}_q \cdot \overline{U}_f$$

Derivujme rovnici pro napětí podle  $x$  a dosadíme rovnici pro derivaci proudu:

$$\frac{d^2 \overline{U}_f}{dx^2} = \overline{Z}_l \cdot \frac{d\overline{I}}{dx} = \overline{Z}_l \cdot \overline{Y}_q \cdot \overline{U}_f = \overline{\gamma}^2 \cdot \overline{U}_f$$

Podobně derivujme rovnice pro proud a dosadíme rovnici pro derivaci napětí

$$\frac{d^2 \overline{I}}{dx^2} = \overline{Y}_q \cdot \frac{d\overline{U}_f}{dx} = \overline{Z}_l \cdot \overline{Y}_q \cdot \overline{I} = \overline{\gamma}^2 \cdot \overline{I}$$

V obou rovnicích je zavedeno označení  $\overline{\gamma} = \sqrt{\overline{Z}_l \cdot \overline{Y}_q}$ , které značí komplexní konstantu šíření.

Druhé derivace napětí a proudu jsou lineárními diferenciálními rovnicemi druhého řádu.

Jejich řešení jak známo je ve tvaru  $e^{\lambda \cdot x} \rightarrow \lambda = \pm \overline{\gamma}$  a obecný integrál bude:



$$\overline{U}_f = \overline{K}_1 \cdot e^{\overline{\gamma} \cdot x} + \overline{K}_2 \cdot e^{-\overline{\gamma} \cdot x}$$

kde  $\overline{K}_1$  ,  $\overline{K}_2$  jsou integrační konstanty.

Z rovnice předchozí pro  $\overline{U}_f$

$$\frac{d\overline{U}_f}{dx} = \overline{Z}_l \cdot \overline{I}$$

vyjádříme proud  $\overline{I}$

$$\begin{aligned} \overline{I} &= \frac{d\overline{U}_f}{dx} \cdot \frac{1}{\overline{Z}_l} = (\overline{K}_1 \cdot \overline{\gamma} \cdot e^{\overline{\gamma} \cdot x} - \overline{K}_2 \cdot \overline{\gamma} \cdot e^{-\overline{\gamma} \cdot x}) \cdot \frac{1}{\overline{Z}_l} = \frac{\overline{\gamma}}{\overline{Z}_l} (\overline{K}_1 \cdot e^{\overline{\gamma} \cdot x} - \overline{K}_2 \cdot e^{-\overline{\gamma} \cdot x}) = \frac{\sqrt{\overline{Z}_l \cdot \overline{Y}_q}}{\overline{Z}_l} (\overline{K}_1 \cdot e^{\overline{\gamma} \cdot x} - \overline{K}_2 \cdot e^{-\overline{\gamma} \cdot x}) = \\ &= \sqrt{\frac{\overline{Y}_q}{\overline{Z}_l}} \cdot (\overline{K}_1 \cdot e^{\overline{\gamma} \cdot x} - \overline{K}_2 \cdot e^{-\overline{\gamma} \cdot x}) \\ \overline{I} &= \frac{1}{\overline{Z}_{vl}} (\overline{K}_1 \cdot e^{\overline{\gamma} \cdot x} - \overline{K}_2 \cdot e^{-\overline{\gamma} \cdot x}) \end{aligned}$$

Zde jsme zavedli pojem vlnová impedance

$$\overline{Z}_{vl} = \sqrt{\frac{\overline{Z}_l}{\overline{Y}_q}}$$

Integrační konstanty  $\overline{K}_1$  a  $\overline{K}_2$  určíme z okrajových podmínek:

Pro konec vedení :  $x = 0$  označíme  $\overline{U}_f = \overline{U}_{f2}$  ,  $\overline{I} = \overline{I}_2$

Pro začátek vedení:  $x = 1$  označíme  $\overline{U}_f = \overline{U}_{f1}$  ,  $\overline{I} = \overline{I}_1$

Tyto podmínky aplikujeme na rovnice

$$\overline{U}_f = \overline{K}_1 \cdot e^{\overline{\gamma} \cdot x} + \overline{K}_2 \cdot e^{-\overline{\gamma} \cdot x}$$

$$\overline{I} = \frac{1}{\overline{Z}_{vl}} (\overline{K}_1 \cdot e^{\overline{\gamma} \cdot x} - \overline{K}_2 \cdot e^{-\overline{\gamma} \cdot x})$$

Pro  $x = 0$  bude:

$$\overline{U}_f = \overline{K}_1 + \overline{K}_2.$$

$$\bar{I} = \frac{1}{Z_{vl}} (\bar{K}_1 - \bar{K}_2)$$

Z těchto rovnic dostaneme

$$\bar{K}_1 = \frac{1}{2} (\bar{U}_{f2} + \bar{Z}_{vl} \bar{I}_2)$$

$$\bar{K}_2 = \frac{1}{2} (\bar{U}_{f2} - \bar{Z}_{vl} \bar{I}_2)$$

Dosazením těchto konstant do výchozích rovnic dostaneme pro začátek vedení (  $x = l$ ):

$$\bar{U}_{f1} = \bar{U}_{f2} \frac{e^{\bar{\gamma}l} + e^{-\bar{\gamma}l}}{2} + \bar{Z}_{vl} \bar{I}_2 \frac{e^{\bar{\gamma}l} - e^{-\bar{\gamma}l}}{2}$$

$$\bar{I}_{f1} = \frac{\bar{U}_{f2}}{\bar{Z}_{vl}} \frac{e^{\bar{\gamma}l} - e^{-\bar{\gamma}l}}{2} + \bar{I}_2 \frac{e^{\bar{\gamma}l} + e^{-\bar{\gamma}l}}{2}$$

Použitím hyperbolických funkcí získáme obvykle rovnice pro řešení napěťových a proudových poměrů na homogenním vedení:

$$(I) \quad \bar{U}_{f1} = \bar{U}_{f2} \cdot \cosh \bar{\gamma}l + \bar{Z}_{vl} \bar{I}_2 \cdot \sinh \bar{\gamma}l \quad [V]$$

$$(II) \quad \bar{I}_1 = \frac{\bar{U}_{f2}}{\bar{Z}_{vl}} \cdot \sinh \bar{\gamma}l + \bar{I}_2 \cdot \cosh \bar{\gamma}l \quad [A]$$

Do rovnice (I) a (II) dosazujeme:

$$\bar{U}_{f2} [V]; \quad \bar{\gamma} [1/km]; \quad l [km]; \quad \bar{Z}_{vl} [\Omega]; \quad \bar{I}_2 [A]; \quad \bar{U}_{f1} [V]; \quad \bar{I}_1 [A]$$

Rovnice (I) a (II) se často píšou ve tvaru:

$$\bar{U}_{f1} = \bar{A} \bar{U}_{f2} + \bar{B} \bar{I}_2$$

$$\bar{I}_1 = \bar{C} \bar{U}_{f2} + \bar{D} \bar{I}_2$$

Konstanty jsou  $\bar{A} [-]$ ;  $\bar{B} [\Omega]$ ;  $\bar{C} [S]$ ;  $\bar{D} [-]$  a nazývají se Blondelovými konstantami pro homogenní vedení.

Platí pro ně podmínky:

$$\bar{A} = \bar{D} \quad , \quad \bar{A} \cdot \bar{D} - \bar{B} \cdot \bar{C} = 1$$

Rovnice (I) a (II) umožňují stanovit vstupní fázory napětí a proudu na zadaném vedení, při výchozích poměrech na konci vedení.

Další potřebné hodnoty na začátku vedení určíme z trojfázového komplexního výkonu.

$$\bar{S}_1 = 3 \bar{U}_{f1}^* \bar{I}_1 = \bar{P}_1 \mp j \bar{Q}_1 \quad [VA; V; A; W; VAR]$$

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{Q_1}{P_1} \rightarrow \cos \varphi_1$$

Ztráty činného výkonu:

$$\Delta P = P_1 - P_2 \quad [W]$$

Účinnost přenosu:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 \quad ; \quad [ \% ; W ; W ]$$

Pro porovnání přenosové schopnosti u vedení vvn a zvn se používá přirozený výkon. Je to takový výkon, při kterém je vedení na svém konci zatíženo impedancí, která je rovna vlnové impedanci, čili

$$\bar{I}_2 = \frac{\bar{U}_{f2}}{Z_{vl}}$$

Trojfázový přirozený výkon odebíraný na konci je:

$$\bar{S}_{p2} = 3 \cdot \bar{U}_{f2}^* \cdot \bar{I}_2 = 3 \cdot \bar{U}_{f2}^* \cdot \frac{\bar{U}_{f2}}{Z_{vl}} = \frac{U_2^2}{Z_{vl}} \quad [MVA; kV; \Omega]$$

Činná složka přirozeného výkonu je podstatně větší, než jeho složka jalová, proto se běžně v literatuře udává přirozený výkon v MW.

Informativní hodnoty pro vedení vvn a zvn:

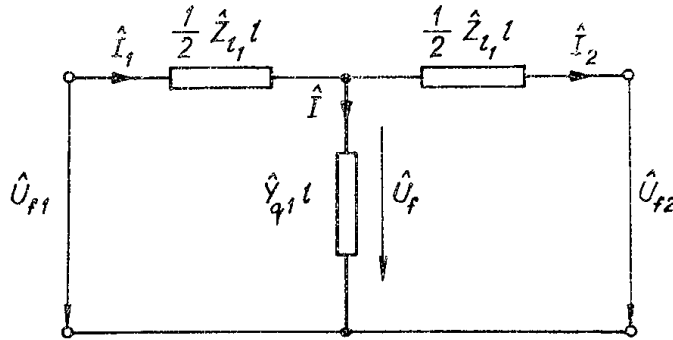
Napětí ( kV )	Vedení vvn, zvn					
	110	220	400	750	1150	1800
Počet vodičů ve svazku	1	1	3	4	8	16
Vlnová impedance ( $\Omega$ )	390	390	280	270	250	230
Přirozený výkon ( MW )	30	120	580	2100	5300	14000

Rozborem základních rovnic (I) a (II) homogenního vedení můžeme studovat různé provozní stavy jako např. chod vedení naprázdno, chod s přirozeným výkonem, chod v oblasti velkých zatížení.

Pro přibližné metody výpočtu dlouhých vedení se často, zejména pro kreslení náhradních schémat sítí, používají náhradní články. Parametry vedení se soustřeďují potřebným způsobem, který je nutný pro vytváření vhodných náhradních článků vedení. Pro tyto přibližné výpočty používáme výpočet pomocí T - článku a II - článku.

### Výpočet vedení pomocí T – článku

Tento článek – jeho parametry – získáme tím způsobem, že podélnou impedancí vedení rozdělíme na dvě poloviny a umístíme je na začátek a konec vedení. Příčnou admitancí umístíme do středního bodu vedení podle obr. 48



Obr. 48

Potom napětí na začátku vedení bude :

$$\bar{U}_1 = \bar{U}_2 + \frac{1}{2} \cdot \bar{Z}_l \cdot l \cdot \bar{I}_2 + \frac{1}{2} \cdot \bar{Z}_l \cdot l \cdot \bar{I}_1$$

Proud na začátku vedení bude:

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_2 + \bar{I}$$

Napětí ve středu vedení, tedy na příčné větvi:

$$\bar{U} = \bar{U}_2 + \frac{1}{2} \cdot \bar{Z}_l \cdot l \cdot \bar{I}_2$$

Proud tekoucí příčnou větví :

$$\bar{I} = \bar{Y}_q \cdot l \cdot \bar{U} = \bar{Y}_q \cdot l \cdot \bar{U}_2 + \frac{1}{2} \cdot \bar{Y}_q \cdot \bar{Z}_l \cdot l^2 \cdot \bar{I}_2$$

Dosazením do vztahu pro proud na začátku dostaneme:

$$\bar{I}_1 = \bar{Y}_q \cdot l \cdot \bar{U}_2 + \left(1 + \frac{\bar{Z}_l \cdot \bar{Y}_q}{2} \cdot l^2\right) \cdot \bar{I}_2$$

Tento proud dosadíme do vztahu pro napětí na začátku:

$$\bar{U}_1 = \left(1 + \frac{\bar{Z}_l \cdot \bar{Y}_q}{2} \cdot l^2\right) \cdot \bar{U}_2 + \bar{Z}_l \cdot l \cdot \left(1 + \frac{\bar{Z}_l \cdot \bar{Y}_q}{4} \cdot l^2\right) \cdot \bar{I}_2$$

Výsledná rovnice napětí a proudu na začátku vedení se zapisuje často pomocí Blondelových konstant pro T – člunek:

$$\bar{U}_1 = \bar{A}_T \cdot \bar{U}_2 + \bar{B}_T \cdot \bar{I}_2$$

$$\bar{I}_1 = \bar{C}_T \cdot \bar{U}_2 + \bar{D}_T \cdot \bar{I}_2$$

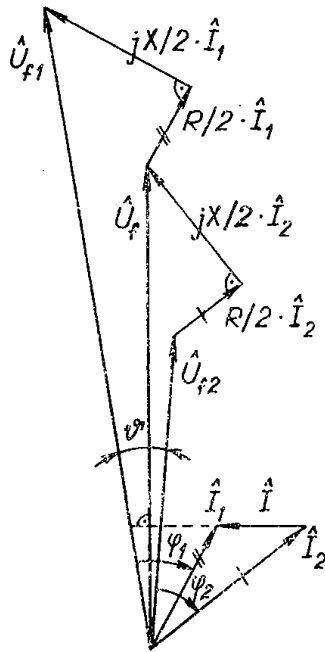
Pro tyto konstanty platí vztahy:

$$\bar{A}_T = \bar{D}_T \quad , \quad \bar{A}_T \cdot \bar{D}_T - \bar{B}_T \cdot \bar{C}_T = 1$$

Do rovnice pro napětí a proud dosazujeme parametry:

$$\bar{Z}_l \text{ [}\Omega/\text{km]}; \bar{Y}_q \text{ [S/km]}; l \text{ [km]}; \bar{U}_2 \text{ [V]}; \bar{U}_1 \text{ [V]}; \bar{I}_1; \bar{I}_2; \text{ [A]}$$

Napěťové a proudové poměry, které jsme získali řešením T – člunku jsou názorně vidět na Obr.49

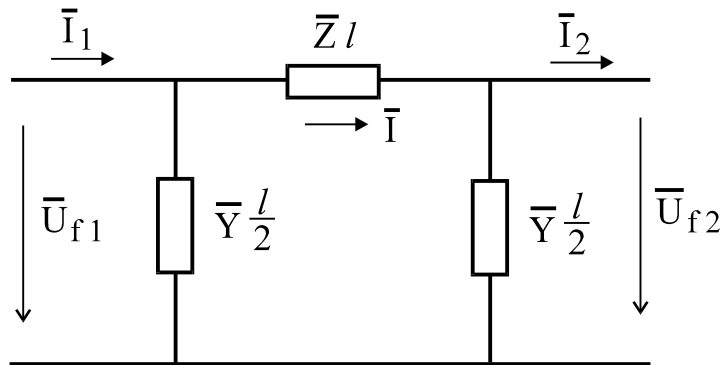


Obr. 49

Z důvodu jednoduchosti diagramu je zanedbán svod  $G = 0$ .

### VÝPOČET VEDENÍ POMOCÍ $\pi$ - ČLÁNKU

Tento náhradní článek vytvoříme tak, že podélnou impedanci dáme do středu vedení a na její začátek a konec připojíme vždy polovinu příčné admittance, jak je to vidět na obr.50.



Obr.50

Pro napětí na začátku platí:

$$\bar{U}_1 = \bar{U}_2 + \bar{Z}_l \cdot \bar{I} = \bar{U}_2 + \bar{Z}_l \cdot (\bar{I}_2 + \bar{I}')$$

Pro proud na začátku vedení platí:

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_2 + \bar{I}' + \bar{I}''$$

Pro proudy do příčných větví platí:

$$\bar{I}' = \frac{1}{2} \bar{Y}_q \cdot l \cdot \bar{U}_2 \quad \bar{I}'' = \frac{1}{2} \bar{Y}_q \cdot l \cdot \bar{U}_1$$

Dosadíme proud I do vztahu pro fázové napětí na začátku vedení:

$$\text{I. } \bar{U}_1 = \left(1 + \frac{\bar{Z}_l \cdot \bar{Y}_q}{2} \cdot l^2\right) \cdot \bar{U}_2 + \bar{Z}_l \cdot l \cdot \bar{I}_2$$

Dále dosadíme příčné proudy I a II s použitím právě odvozeného vztahu pro napětí na začátku do vztahu pro proud na začátku a po patřičné úpravě dostaneme:

$$\text{II. } \bar{I}_1 = \bar{Y}_q \cdot l \left(1 + \frac{\bar{Z}_l \cdot \bar{Y}_q}{4} \cdot l^2\right) \cdot \bar{U}_2 + \left(1 + \frac{\bar{Z}_l \cdot \bar{Y}_q}{2} \cdot l^2\right) \cdot \bar{I}_2$$

Rovnice (I) a (II) opět zapíšeme pomocí Blondelových konstant - článku:

$$\begin{aligned} \bar{U}_1 &= \bar{A}_\pi \cdot \bar{U}_2 + \bar{B}_\pi \cdot \bar{I}_2 \\ \bar{I}_1 &= \bar{C}_\pi \cdot \bar{U}_2 + \bar{D}_\pi \cdot \bar{I}_2 \end{aligned}$$

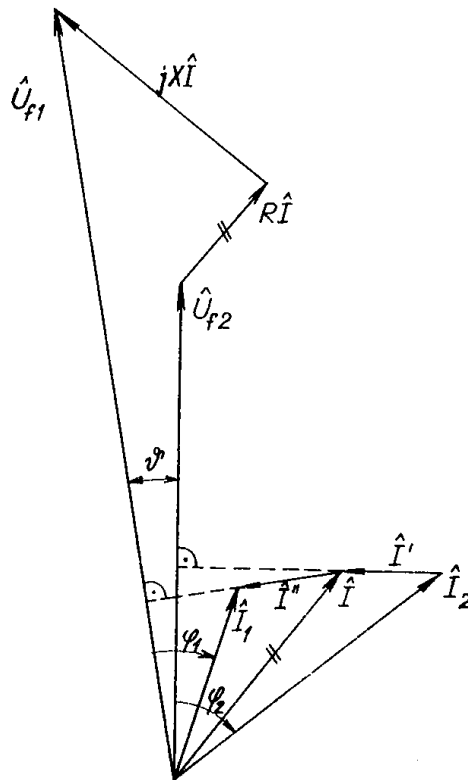
Pro které opět platí:

$$\bar{A}_\pi = \bar{D}_\pi \quad , \quad \bar{A}_\pi \cdot \bar{D}_\pi - \bar{B}_\pi \cdot \bar{C}_\pi = 1$$

Do rovnice (I) a (II) opět dosazujeme v následujících jednotkách:

$$\bar{Z}_l \text{ [}\Omega/\text{km]} ; \bar{Y}_q \text{ [S/km]} ; l \text{ [ km ]} ; \bar{U}_2, \bar{U}_1 \text{ [ V ]} ; \bar{I}_2, \bar{I}_1 \text{ [ A ]}$$

Napěťové a proudové poměry odvozené pomocí  $\pi$  - článku jsou vidět na obr. 51. Zde je zanedbán svod,  $G = 0$ .

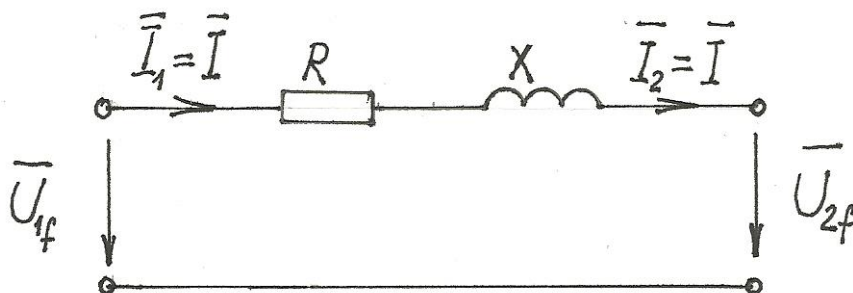


Obr.51

### TROJFÁZOVÉ VEDENÍ A SÍŤE vn a nn

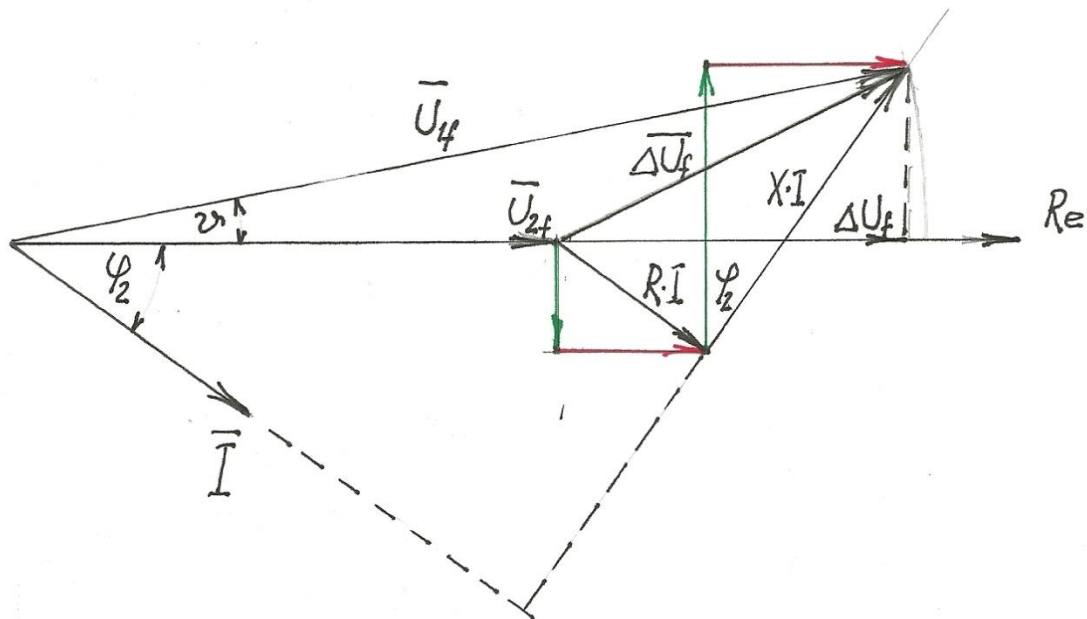
Tato vedení zajišťují zásobování elektrickou energií průmysl, zemědělství, stavebnictví, dopravu, města, vesnice i jednotlivé spotřebiče. U těchto vedení vyšetřujeme přednostně napěťové a výkonové poměry, proto mají velký vliv na tyto poměry činný odpor a indukční reaktance, tedy t.zv. podélné parametry. Odvodíme tedy potřebné vztahy pro vn. V sítích nn můžeme obvykle zanedbat reaktanci  $X$  ( $X \rightarrow 0$ ). Proto postačí v odvozených vztazích dosadit  $X = 0$  a získáme potřebné vztahy pro vedení a sítě nn.

Protože opět předpokládáme jako dříve souměrné zatížení, postačí řešit vše pro jednu fázi jak je uvedeno na obr.52.



Obr.52

Konec vedení označujeme indexem 2, začátek vedení indexem 1. Pro toto náhradní schéma můžeme kreslit fázorový diagram přenosu na obr.53



Obr.53

Rozložíme-li úbytky napětí  $R \cdot \bar{I}$  a  $X \cdot \bar{I}$  na reálné a imaginární složky jak je v obr.53 naznačeno čárkovaně, vidíme že členy  $R I_{\varepsilon}$  a  $X I_j$  ovlivňují zejména velikost  $\Delta \bar{U}_f$

$R I_j$  a  $X I_{\varepsilon}$  ovlivňují zejména úhel  $\psi$  mezi  $\bar{U}_{f1}$  a  $\bar{U}_{f2}$

Protože za normálního provozu je úhel  $\psi$  velmi malý asi do  $3^\circ$ , můžeme při praktickém výpočtu uvažovat pouze reálnou část úbytku napětí:

$$\Delta \bar{U}_f \cong \Delta U_f = R \cdot I_{\varepsilon} + X \cdot I_j$$

Tuto rovnici získáme matematickým postupem tak, že vyjádříme komplexní úbytek napětí pomocí Ohmova zákona a proud rozložíme na činnou a jalovou složku:

$$\Delta \bar{U}_f = \bar{Z}_l \cdot \bar{I} = (R + jX) \cdot (I_{\varepsilon} \mp j I_j)_{KAP}^{IND} = R I_{\varepsilon} \pm X I_j + j(X I_{\varepsilon} \mp R I_j)_{KAP}^{IND}$$

Pokud zanedbáme imaginární člen v předchozí rovnici bude:

$$\Delta \bar{U}_f \cong \Delta U_f = R \cdot I_{\varepsilon} \pm X \cdot I_j \quad_{KAP}^{IND}$$

Pravou stranu rozšířme výrazem  $3 \cdot U_f$



$$\Delta U_f = \frac{R \cdot 3 \cdot U_f \cdot I_\varepsilon \pm X \cdot 3 \cdot U_f \cdot I_j}{3 \cdot U_f} = \frac{R \cdot P \pm X \cdot Q_{KAP}^{IND}}{3 \cdot U_f}$$

Z této rovnice lze určit úbytek napětí při zadaném trojfázovém činném a jalovém výkonu. Pokud chceme znát procentní úbytek napětí

$$\Delta u \% = \frac{\Delta U_f}{U_f} \cdot 100 = \frac{R \cdot P \pm X \cdot Q}{3 \cdot U_f^2} \cdot 100 = \frac{R \cdot P \pm X \cdot Q}{U^2} \cdot 100 \frac{IND}{KAP}$$

Trojfázové ztráty činného výkonu určíme z výrazu pro změnu komplexního výkonu na vedení:

$$\Delta \bar{S} = 3 \cdot \Delta \bar{U}_f \cdot \bar{I}^* = 3 \cdot \bar{Z}_l \cdot \bar{I} \cdot \bar{I}^* = 3 \cdot \bar{Z}_l \cdot I^2 = 3 \cdot (R + jX) \cdot I^2 = 3 \cdot R \cdot I^2 + j \cdot 3 \cdot X \cdot I^2 = \Delta P + j \cdot \Delta Q$$

$$\Delta P = 3 \cdot R \cdot I^2 = 3 \cdot R \cdot (I_c^2 + I_j^2)$$

Z této rovnice je vidět, že i jalový proud, který teče vedením způsobuje činné ztráty. Do této rovnice dosadíme výrazy za činný odpor vedení

$$R = \rho \cdot \frac{l}{s} \quad \text{a za trojfázový činný výkon} \quad P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \Rightarrow I^2 = \frac{P^2}{3 \cdot U^2} \cdot \cos^2 \varphi$$

$$\Delta P = \frac{\rho}{s \cdot U^2 \cdot \cos^2 \varphi} \cdot l \cdot P^2$$

Procentní ztráty činného výkonu budou:

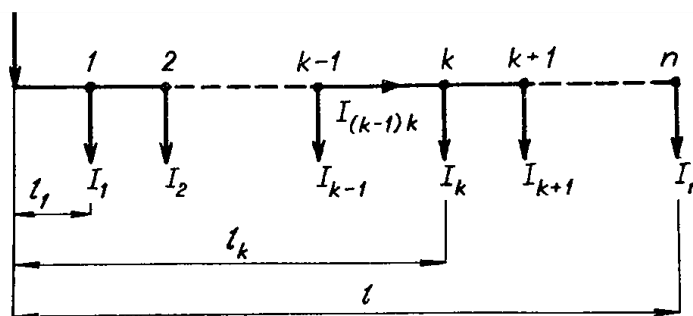
$$\Delta p \% = \frac{\Delta P}{P} \cdot 100 = \frac{\rho \cdot 100}{s \cdot U^2 \cdot \cos^2 \varphi} \cdot l \cdot P$$

### TROJFÁZOVÉ VEDENÍ vn JEDNOSTRANNĚ NAPÁJENÉ

Při řešení tohoto vedení udáváme podélnou impedanci na 1 km délky ve tvaru:

$$\bar{Z}_{l1} = R_1 + j \cdot X_1$$

A předpokládáme ji jednotnou v celé délce, obr. 54



Obr.54

Určíme úbytky v jednotlivých úsecích od konce

$$\begin{aligned}\overline{\Delta U}_{(k+1),n} &= \overline{Z}_{l1} \cdot l_{(k+1),n} \cdot \overline{I}_n \\ \overline{\Delta U}_{k,(k+1)} &= \overline{Z}_{l1} \cdot l_{k,(k+1)} \cdot \overline{I}_n + \overline{Z}_{l1} \cdot l_{k,(k+1)} \cdot \overline{I}_{k+1} \\ \overline{\Delta U}_{(k-1),k} &= \overline{Z}_{l1} \cdot l_{(k-1),k} \cdot \overline{I}_n + \overline{Z}_{l1} \cdot l_{(k-1),k} \cdot \overline{I}_{k+1} + \overline{Z}_{l1} \cdot l_{(k-1),k} \cdot \overline{I}_k \\ &\vdots \\ \overline{\Delta U}_{A,1} &= \overline{Z}_{l1} \cdot l_{A,1} \cdot \overline{I}_n + \dots + \dots + \dots + \dots + \dots + \dots + \dots + \dots + \dots + \overline{Z}_{l1} \cdot l_{A,1} \cdot \overline{I}_1\end{aligned}$$

Jednotlivé úbytky sečteme a dostaneme celkový úbytek na vedení:

$$\overline{\Delta U}_{A,n} = \overline{Z}_{l1} (\overline{I}_n \cdot l_n + \dots + l_{k+1} \cdot \overline{I}_{k+1} + l_k \cdot \overline{I}_k + l_{k-1} \cdot \overline{I}_{k-1} + \dots + l_1 \cdot \overline{I}_1)$$

Na konci vedení je největší úbytek:

$$\overline{\Delta U}_{f \max} = \overline{\Delta U}_{A,n} = \overline{Z}_{l1} \cdot \sum_{k=1}^n l_k \cdot \overline{I}_k$$

A opět zanedbáme –li imaginární část dostaneme po úpravě:

$$\Delta U_{f \max} \cong R_1 \cdot \sum_{k=1}^n l_k \cdot I_{c,k} \pm X_1 \cdot \sum_{k=1}^n l_k \cdot I_{j,k} \quad \begin{matrix} IND \\ KAP \end{matrix}$$

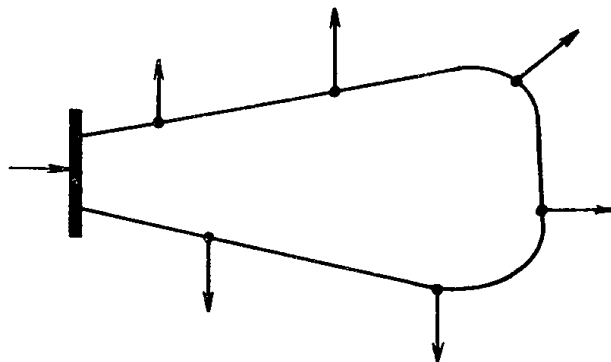
A obdobně po rozšíření pravé strany rovnice výrazem  $3 \cdot U_f$

$$\Delta U_{f \max} \cong \frac{R_1 \cdot \sum_{k=1}^n l_k \cdot P_k \pm X_1 \cdot \sum_{k=1}^n l_k \cdot Q_k \quad \begin{matrix} IND \\ KAP \end{matrix}}{3 \cdot U_f}$$

Potom procentní úbytek bude:

$$\Delta u_f \% = \frac{\Delta U_{f \max}}{U_f} \cdot 100 = \frac{R_1 \cdot \sum_{k=1}^n l_k \cdot P_k \pm X_1 \cdot \sum_{k=1}^n l_k \cdot Q_k \quad \begin{matrix} IND \\ KAP \end{matrix}}{U^2} \cdot 100$$

### TROJFÁZOVÉ VEDENÍ vn NAPÁJENÉ DVOUSTRANNĚ



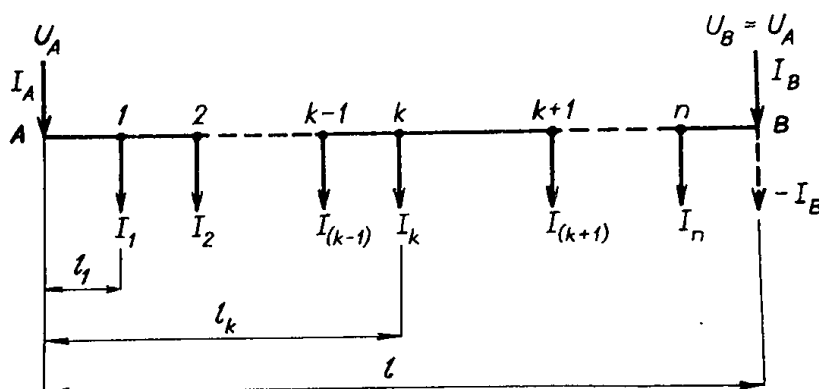
obr.55

Takto provedené vedení zvyšuje jistotu dodávky elektrické energie. Při přerušení některého úseku např. v místě X, je zajištěn provoz sítě jako paprskové.

Pro výpočet využijeme předchozích výsledků. Předpokládáme provedení vedení stejné ve všech úsecích. Potom podélná impedance vedení bude:

$$\bar{Z}_{l1} = R_1 + jX_1 \quad [\Omega/\text{km}]$$

Síť z obr.55 překreslíme podle obr.56 jako předchozí síť jednostranně napájenou, ve které je napájecí proud bodu B uvažován jako neznámý odběr  $-I_B$ . Dále musí být úbytek mezi napájecími body A a B nulový tj.  $\bar{U}_A = \bar{U}_B$ .



Obr.56

Za těchto podmínek bude úbytek napětí podle vztahu pro jednostranně napájené vedení:

$$\Delta \bar{U}_{AB} = 0 = \bar{Z}_{l1} \cdot \sum_{k=1}^n l_k \cdot \bar{I}_k - \bar{Z}_{l1} \cdot l \cdot \bar{I}_B$$

A z toho neznámý proud napáječe  $I_B$  bude:

$$\bar{I}_B = \frac{\sum_{k=1}^n l_k \cdot \bar{I}_k}{l}$$

Proud druhého napáječe zjistíme z rovnosti proudových momentů:

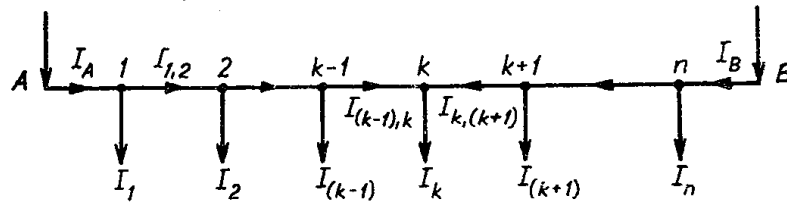
$$\bar{I}_A \cdot l = \sum_{k=1}^n (l - l_k) \cdot \bar{I}_k$$

$$\bar{I}_A = \frac{\sum_{k=1}^n (l - l_k) \cdot \bar{I}_k}{l}$$

Přitom pro proudy odběrové a napájecí platí vztah:

$$\bar{I}_A + \bar{I}_B = \sum_{y=1}^n \bar{I}_y$$

Dále je nutné stanovit proudové rozložení podél vedení a místo změny směru dodávky „k“ podle obr.57.



Obr.57

Oproti stejnosměrnému vedení se u okružního vedení často vyskytuje jedno místo, kde se mění znaménko činného proudu a druhé místo, kde se mění znaménko jalového proudu. Potom o místě maximálního úbytku se rozhodne výpočtem pro oba body „k“ podle vztahu:

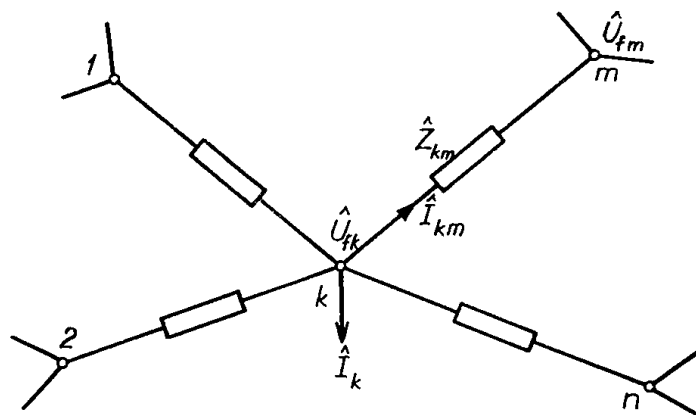
$$\Delta U_{f \max} = R_1 \cdot \sum_{m=1}^{k-1} l_m \cdot I_{\check{c},m} \pm X_1 \cdot \sum_{m=1}^{k-1} l_m \cdot I_{j,m} + R_1 \cdot I_k \cdot I_{\check{c},(k-1),k} \pm X_1 \cdot I_k \cdot I_{j,(k-1),k} \quad \begin{matrix} IND \\ KAP \end{matrix}$$

## UZLOVÉ SÍTĚ vn

Při výpočtu uzlových sítí musíme určit:

- 1) proudové zatížení jednotlivých napaječů
- 2) proudové rozložení v jednotlivých větvích
- 3) napěťové poměry v jednotlivých uzlech
- 4) místo největšího úbytku napětí
- 5) ztráty činného výkonu
- 6) poměry při výpadech části sítě

Pro výpočet těchto sítí je k dispozici poměrně velký počet metod výpočtu. Budeme se zajímat o jeden z nich, který je vhodný pro zpracování na počítačích – metoda uzlových napětí.



Obr.58

Na obr.58 vidíme výřez uzlové sítě s  $n$  – uzly. Zde jsou zadány podélné impedance  $\overline{Z}_{km}$  jednotlivých větví, odběrové proudy  $\overline{I}_k$  a alespoň jedno napětí (obvykle napájecí místo). Abychom zjednodušili zápis používáme podélné admitance

$$\overline{Y}_{km} = \overline{Z}_{km}^{-1} = \frac{1}{R_{km} + jX_{km}}$$

Z rovnováhy uzlu  $k$  lze psát:

$$\overline{I}_k + \sum_{m=1}^n \overline{I}_{km} = 0$$

Dále pro proud ve větvi  $k$ - $m$  platí podle Ohmova zákona

$$\overline{I}_{km} = (\overline{U}_{fk} - \overline{U}_{fm}) \cdot \overline{Y}_{km}$$

Dosadíme za  $\overline{I}_{km}$  do vztahu pro rovnováhu proudu v uzlu. Potom bude:

$$\overline{I}_k = -\sum_{m=1}^n (\overline{U}_{fk} - \overline{U}_{fm}) \cdot \overline{Y}_{km} \quad \text{pro } m \neq k$$

a po úpravě

$$\overline{I}_k = -\overline{U}_{fk} \cdot \sum_{m=1}^n \overline{Y}_{km} + \sum_{m=1}^n \overline{U}_{fm} \cdot \overline{Y}_{km} \quad \text{pro } m \neq k$$

Zavedeme označení:

$$\overline{Y}_{kk} = -\sum_{m=1}^n \overline{Y}_{km} \quad \text{pro } m \neq k$$

a tento výraz nazveme vlastní uzlová admitance. Získáme ji tak, že pro  $k$ -tý uzel sečteme všechny vodivosti vycházející z tohoto uzlu do uzlu sousedních (s opačným znaménkem).

$$\overline{Y}_{km} = \overline{Y}_{mk} \quad \text{pro } m \neq k$$

nazýváme meziuzlovou admitancí.

Pro uzly bezprostředně související je rovna  $\overline{Z}_{km}^{-1}$ . Pro ostatní uzly nesouvisející

$$\overline{Y}_{km} = 0$$

Potom původní rovnici pro  $\overline{I}_k$  lze přepsat do tvaru:

$$\overline{I}_k = \sum_{m=1}^n \overline{Y}_{km} \cdot \overline{U}_{fm} \quad \text{pro } k = m \text{ píšeme } \overline{Y}_{kk} \text{ zavedený výše}$$

$$\text{pro } k \neq m \text{ píšeme } \overline{Y}_{km} = \overline{Y}_{mk}$$

Tuto poslední rovnici lze přepsat do maticového tvaru:

$$\begin{pmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \bar{I}_3 \\ \vdots \\ \bar{I}_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{Y}_{11} & \bar{Y}_{12} & \bar{Y}_{13} & \cdots & \bar{Y}_{1n} \\ \bar{Y}_{21} & \bar{Y}_{22} & \bar{Y}_{23} & \cdots & \bar{Y}_{2n} \\ \bar{Y}_{31} & \bar{Y}_{32} & \bar{Y}_{33} & \cdots & \bar{Y}_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \bar{Y}_{n1} & \bar{Y}_{n2} & \bar{Y}_{n3} & \cdots & \bar{Y}_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{U}_{f1} \\ \bar{U}_{f2} \\ \bar{U}_{f3} \\ \vdots \\ \bar{U}_{fn} \end{pmatrix}$$

Předpokládáme, že je dáno napětí v prvním uzlu a provedeme vyznačení submatic. Jednotlivé submatice označíme a původní zápis zjednodušíme.

$$\begin{pmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}^x \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{Y}_{11} & \bar{Y}_{1P} \\ \bar{Y}_{1P} & \bar{Y}^x \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{U}_{f1} \\ \bar{U}_f^x \end{pmatrix}$$

Řešením získáme dvě rovnice

$$\bar{I}_1 = \bar{Y}_{11} \bar{U}_{f1} + \bar{Y}_{1P} \bar{U}_f^x$$

$$\bar{I}^x = \bar{Y}_{1P} \bar{U}_{f1} + \bar{Y}^x \bar{U}_f^x$$

Druhá rovnice umožňuje určit neznámá napětí ve všech uzlech  $2 \div n$ :

$$\bar{U}_f^x = [\bar{Y}^x]^{-1} [\bar{I}^x] - [\bar{Y}^x]^{-1} \cdot [\bar{Y}_{1P}] \cdot \bar{U}_{f1}$$

Proudy v jednotlivých větvích se určí z rovnice:

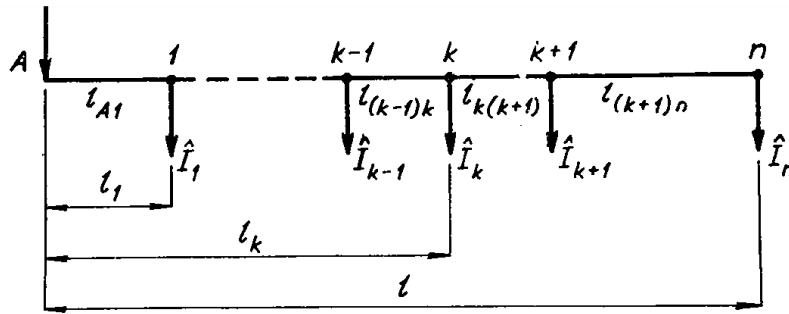
$$\bar{I}_{km} = (\bar{U}_{fk} - \bar{U}_{fm}) \cdot \bar{Y}_{km} \quad \text{pro } m \neq k$$

protože všechna napětí jsme již určili.

## **JEDNODUCHÁ VEDENÍ STEJNOSMĚRNÁ nn, vn**

Tato vedení jsou dvou vodičová. Předpokládáme průřezy a materiál obou vodičů stejné.

a) Jednoduché vedení napájené z jedné strany – osamělé zátěže



Obr. 59

Je třeba určit max.  $\Delta U$  na konci vedení. Postupujeme dvojitým způsobem:

1) sčítáme dílčí úbytky napětí v jednotlivých úsecích, vyvolané proudy tekoucími těmito úseky.

Úbytek napětí obecně v  $k$ -tém úseku je:

$$U_{(k-1)} - U_k = \Delta U_{(k-1),k} = 2 \cdot \frac{\rho}{S} (l_k - l_{(k-1)}) I_{(k-1),k} \quad [\text{V}; \Omega \text{mm}^2/\text{m}; \text{mm}^2; \text{m}; \text{A}]$$

Proud v  $k$ -tém úseku je dán součtem odběrových proudů  $I_k \div I_n$ .

$$I_{(k-1),k} = \sum_{y=k}^n I_y$$

Sečteme-li nyní jednotlivé úbytky od počátku až do koncového bodu odběru dostaneme maximální úbytek napětí

$$\Delta U_n = \sum_{k=1}^n \Delta U_{(k-1),k} = 2 \cdot \frac{\rho}{S} \cdot \sum_{k=1}^n (l_k - l_{(k-1)}) \cdot \sum_{y=k}^n I_y$$

2) sčítáme úbytky napětí způsobené jednotlivými odběry

$$\Delta U_n = 2 \cdot \frac{\rho}{S} \cdot \sum_{k=1}^n l_k \cdot I_k$$

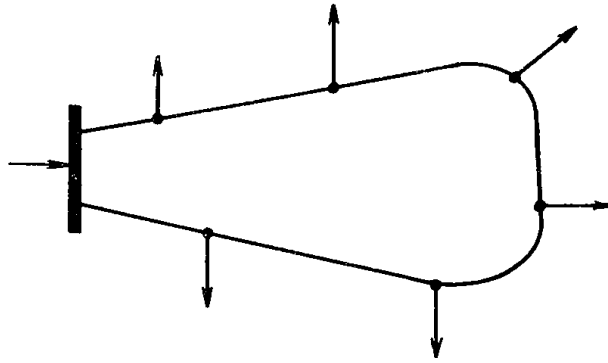
Jeden i druhý způsob vede ke stejným výsledkům. Součin  $l_k \cdot I_k$  nazýváme proudovým momentem.

Procentní úbytek napětí bude:

$$\Delta u\% = \frac{\Delta U}{U_n} \cdot 100 \quad [\%, \text{V}, \text{V}]$$

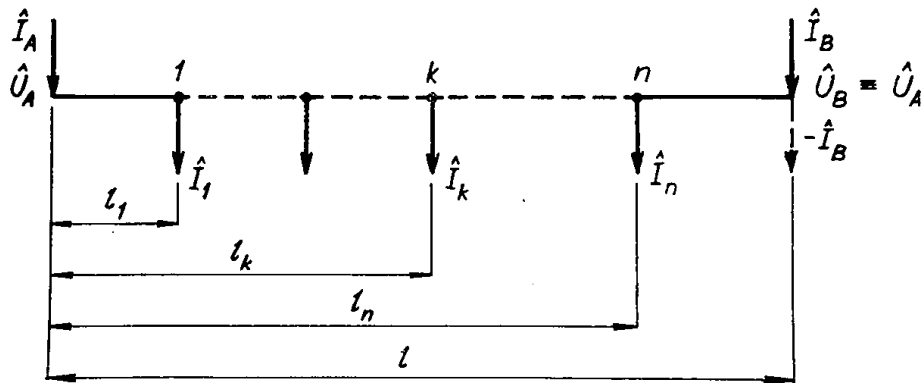
$$\Delta u\% = \frac{200 \cdot \rho}{S \cdot U_n} \cdot \sum_{k=1}^n l_k \cdot I_k$$

b) Jednoduché vedení napájené ze dvou stran



Obr. 60

Řešení tohoto případu provedeme předchozím způsobem. Vedení překreslíme podle obr.61 kde jsme vyznačili



obr.61

napájecí proud  $I_B$  jako neznámý záporný odběr  $-I_B$ . Tím jsme dostali případ jednostranně napájeného vedení, u kterého je úbytek napětí mezi napáječi nulový ( $U_A = U_B$ )

Pro úbytek napětí můžeme psát:

$$\Delta U_{AB} = 0 = U_A - U_B = 2 \cdot \frac{\rho}{S} \cdot \sum_{k=1}^n l_k \cdot I_k - 2 \cdot \frac{\rho}{S} \cdot l \cdot I_B$$

Z této rovnice lze určit neznámý proud  $I_B$ :

$$I_B = \frac{\sum_{k=1}^n l_k \cdot I_k}{l}$$

Obdobně pro proud  $I_A$ :

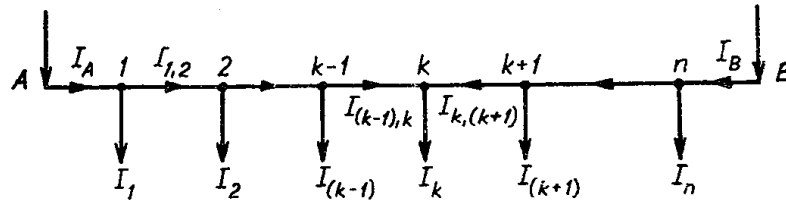
$$I_A = \frac{\sum_{k=1}^n (l - l_k) \cdot I_k}{l}$$

Pro oba proudy musí platit:



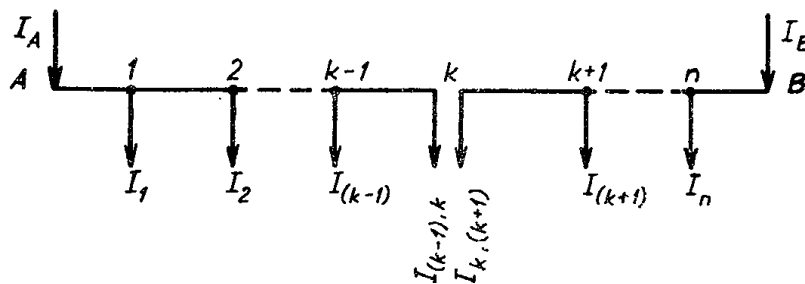
$$I_A + I_B = \sum_{y=1}^n I_y$$

Určíme nyní rozložení proudů podél vedení podle Kirchhoffova zákona viz obr.62



Obr. 62

Vidíme, že na vedení lze najít místo „k“, které je místem předělu napájení. V tomto místě je největší úbytek napětí. Vedení lze v tomto místě rozdělit na dvě jednostranně napájená vedení viz obr.63

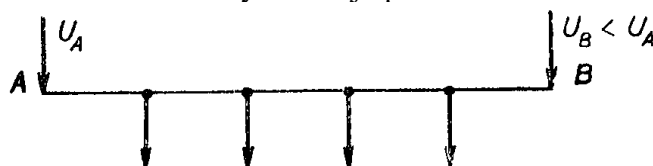


Obr. 63

Původní odběr  $I_k$  je rozložen na dvě části podle obr.63.

### Jednoduché vedení napájené ze dvou stran - $U_A \neq U_B$

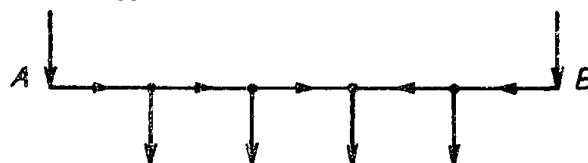
Vedení je napájeno ze dvou nezávislých zdrojů podle obr.64



Obr.64

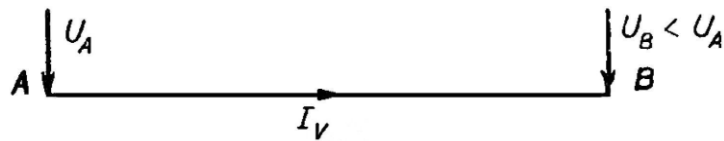
Případ řešíme ve třech krocích:

a) Předpokládáme  $U_A = U_B$  a využijeme předchozí postup. Dostaneme proudové rozložení podél vedení obr.65



Obr.65

b) Předpokládáme  $U_A \neq U_B$  a nulové odběry podle obr. 66

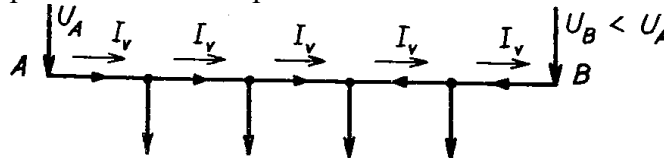


Obr.66

Z místa vyššího napětí teče do místa nižšího napětí vyrovnávací proud  $I_v$ , který je limitován činným odporem vedení:

$$I_v = \frac{U_A - U_B}{2 \cdot \frac{\rho}{s} \cdot l}$$

c) Provedeme superpozici obou řešení podle obr.67



Obr.67

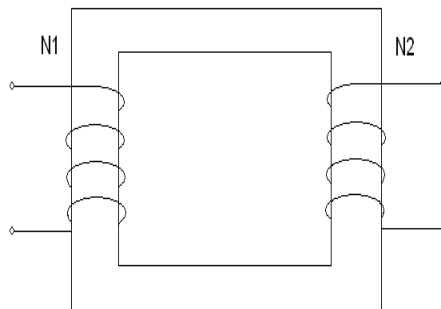
Další postup je shodný s předchozím případem.

## TRANSFORMÁTOR IDEÁLNÍ

Pro ideální transformátor platí následující podmínky :

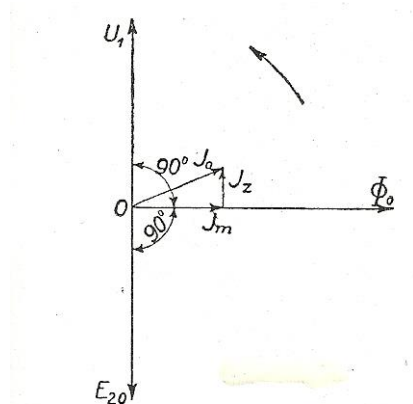
- odpor vinutí je nulový  $R=0$
- neexistuje rozptylový tok (tok prochází celý jádrem)
- permeabilita jádra je tak vysoká, že je potřebný pouze zanedbatelný magnetizační proud pro vytvoření potřebného magnetického toku
- hysterezní ztráty a ztráty vířivými proudy jsou nulové.

Princip transformátoru je vidět na obrázku obr.68



obr.68

Po připojení sinusového napětí  $U_1$  na primár se vytvoří magnetický tok  $\Phi_{\max} = \frac{U_1}{4,44 \cdot f \cdot N_1}$



obr.69

Tento tok indukuje v primárním vinutí napětí  $E_1$ . Toto napětí bude rovné zdrojovému napětí  $U_1$  s opačným znaménkem (podle K. zákona z důvodu udržení rovnosti napětí v obvodu). Magnetický tok prochází i sekundárním vinutím a vytvoří indukované napětí  $E_2$  a svorkové napětí  $U_2 = E_2 = 4,44 \cdot f \cdot N_2 \cdot \Phi_{\max}$  obr.69. Po dosazení za  $\Phi_{\max}$  dostaneme

$$U_2 = \frac{N_2}{N_1} \cdot U_1 \quad \text{a} \quad U_1 = \frac{N_1}{N_2} \cdot U_2$$

Nyní připojíme na sekundární svorky impedanci  $Z_2$ . Tím se vytvoří sekundární proud  $I_2$

$$I_2 = \frac{U_2}{Z_2}$$

a vzniká magnetomotorické napětí  $N_2 \cdot I_2$  v sekundárním obvodu. Jakmile se objeví magnetomotorické napětí, začíná se okamžitě měnit původní magnetický tok a tím dochází k porušení rovnováhy napětí v primáru. Aby se rovnováha udržela, musí v primáru vzniknout kompenzační magnetomotorické napětí a tedy proud  $I_1$  takový, aby platilo

$$N_1 \cdot I_1 = N_2 \cdot I_2$$

a z toho

$$I_1 = \frac{N_2}{N_1} \cdot I_2 \quad \text{a} \quad I_2 = \frac{N_1}{N_2} \cdot I_1$$

Protože z předchozích rovnic plyne

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{U_2}{U_1} \quad \text{a} \quad \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2}$$

pak za předpokladu nulových ztrát (ideální transformátor) platí

$$U_2 \cdot I_2 = U_1 \cdot I_1$$

Vyšetřeme nyní, jak se projeví na primární straně připojení impedance  $Z_2$  na straně sekundární. Výše byly odvozeny vztahy

$$\begin{aligned} U_1 &= \frac{N_1}{N_2} \cdot U_2 & I_1 &= \frac{N_2}{N_1} \cdot I_2 \\ Z_2 &= \frac{U_2}{I_2} & Z_1 &= \frac{U_1}{I_1} \end{aligned}$$

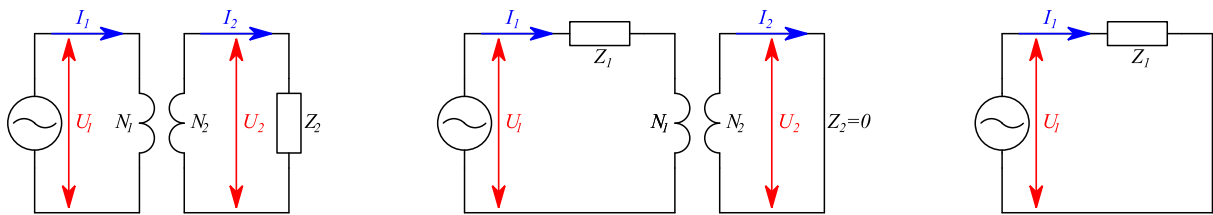
Lze tedy psát:

$$\frac{U_1}{I_1} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \cdot \frac{U_2}{I_2}$$

$$Z_1 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \cdot Z_2$$

Z uvedeného je vidět, že impedanci  $Z_2$  na sekundární straně, lze nahradit ekvivalentní impedancí  $Z_1$  na straně primární.

Sledujeme-li chování níže uvedených obvodů ze strany primární vidíme, že jsou tyto obvody ekvivalentní obr.70



obr.70

Toto je převod impedance z jedné strany na druhou. Vidíme, že v ideálním transformátoru se transformuje:

- napětí v přímém poměru počtu závitů
- proud v nepřímém poměru tohoto počtu
- impedance se čtvercem přímého poměru počtu závitů.

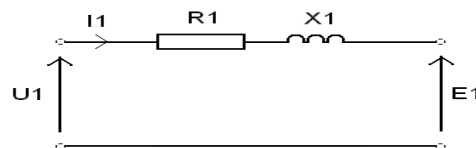
Přejdeme nyní ke skutečnému transformátoru. U skutečného transformátoru nastávají odchylky od ideálního stavu.

Jako prvá odchylka je rozdělení celkového magnetického toku primáru na dvě složky:

- tok spřažený – prochází i vinutím sekundárním
- tok rozptylový – prochází pouze vinutím primárním a převážně se uzavírá vzduchem.

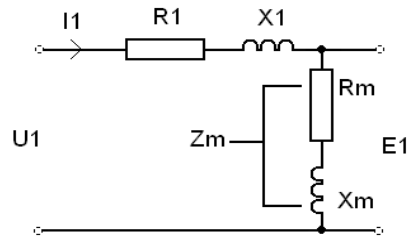
Obě tyto složky indukují v primáru napětí. Protože cesty rozptylového toku jdou hlavně vzduchem, je tento tok a jím indukované napětí lineárně závislý na primárním proudu  $I_1$ .

U skutečného transformátoru je dále  $R \neq 0$ . Svorkové napětí  $U_1$  na primáru je tedy rovno součtu úbytku napětí na odporu  $R_1$ , úbytku napětí na rozptylové reaktanci a indukovanému napětí  $E_1$ .



obr.71

Dále je u skutečného transformátoru nutný proud  $I_e$  pro vytvoření magnetomotorického napětí a na krytí ztrát v jádře. To je respektováno připojením budící impedance  $Z_m$ .



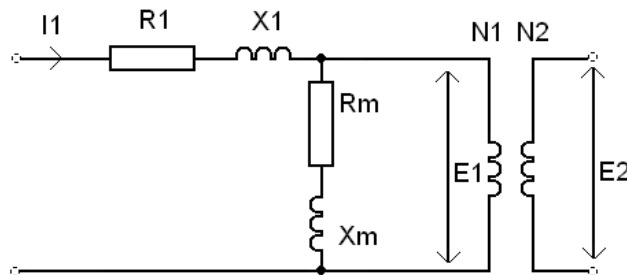
obr.72

Tato budící impedance se mění se sycením, ale má malý vliv ve srovnání s primární rozptylovou reaktancí. Součet  $X_1 + X_m$  je roven celkové vlastní reaktanci primáru. Sprážený tok indukuje napětí  $E_2$  v sekundáru.

Platí:

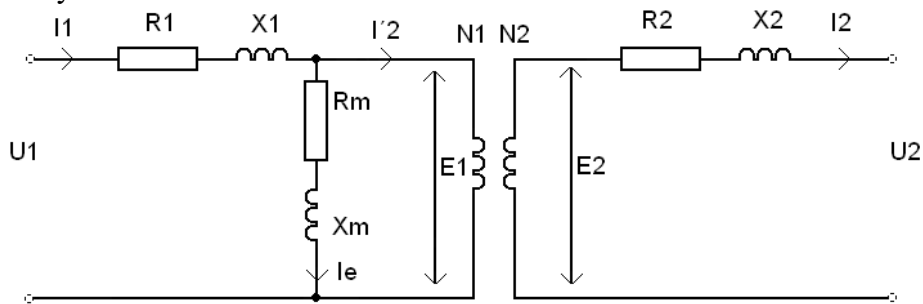
$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

To ovšem znamená, že tento efekt lze nahradit připojením ideálního transformátoru.



obr.73

Indukované napětí  $E_2$  není napětím svorkovým, protože i sekundární vinutí má rovněž nenulový odpor  $R_2$  a sekundární proud  $I_2$  vytvoří sekundární rozptylový tok, který zabírá pouze se závitů sekundárního vinutí.



obr.74

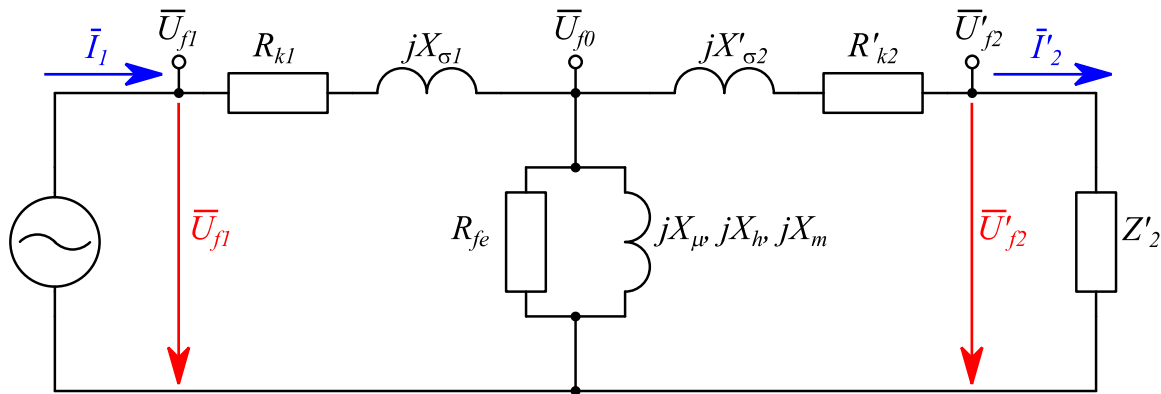
Zde  $I_2'$  je zátěžová složka primárního proudu podle vztahu

$$I_2' = \frac{N_2}{N_1} \cdot I_2$$

a celkový primární proud je

$$I_1 = I_2' + I_e$$

Skutečný transformátor je tedy ekvivalentní ideálnímu s přidavnými vnějšími impedancemi. Převědeme-li všechny impedance na jednu stranu (primární nebo sekundární), lze ideální transformátor přesunout vpravo nebo vlevo v náhradním schéma. Obvykle se v náhradním schéma ideální transformátor nekreslí. Je nutné si však vždy uvědomit na kterou stranu jsou všechny parametry převedeny obr.75



obr.75

## TRANSFORMÁTOR – provedení, provozní údaje

Je složen z uzavřeného magnetického obvodu a z primárního a sekundárního vinutí. Magnetický obvod je tvořen železným jádrem, které je samo složeno ze vzájemně izolovaných křemíkových plechů. Cívky vinutí jsou navlečené na sloupky jádra. Jako primární označujeme to vinutí, na které přivádíme energii. Ze sekundární strany energii odebíráme. Výše napětí závisí na potřebě a okolnostech použití trafá.

Základní vztahy:

Připojíme-li na primární vinutí střídavé napětí  $U_1$ , začne vinutím protékat primární proud  $I_1$ . Část proudu  $I_1$  vytvoří střídavý magnetický tok  $\Phi_m$ , který se uzavírá magnetickým obvodem. Velikost tohoto toku závisí na svorkovém napětí  $U_1$ , na kmitočtu  $f$  a na počtu závitů primární cívky  $N_1$  podle známého vztahu:

$U_1 = 4,44 \cdot \Phi_m \cdot f \cdot N_1$  - rovnice transformátoru

Střídavý magnetický tok prochází i přes sekundární vinutí s počtem závitů  $N_2$ . Podle zákona o indukci, indukuje se v každém závitě sekundární cívky napětí na jeden závit jako u primární cívky.

Pro primární cívku platí:

$$U_{1/N} = \frac{U_1}{N_1} \text{ - na jeden závit}$$

Pro sekundární cívku platí:

$$U_{2/N} = \frac{U_2}{N_2} \text{ - na jeden závit}$$

Je tedy  $U_{1/N} = U_{2/N}$  a proto

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad - \text{ to je převod vinutí transformátoru}$$

Pro bezztrátový transformátor platí:

$$U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2 \quad \rightarrow \frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

Protože u skutečného trať jsou ztráty malé (poměrně) aplikují se tyto vztahy i na skutečný transformátor.

Výkon transformátoru:

$$S = U_{f2} \cdot I_2 \quad - \text{ jednofázový transformátor}$$

$$S_{3f} = 3 \cdot U_{f2} \cdot I_2 = 3 \cdot \frac{U_{s2}}{\sqrt{3}} \cdot I_2 = \sqrt{3} \cdot \frac{3 \cdot U_{s2}}{3} \cdot I_2 = \sqrt{3} \cdot U_{s2} \cdot I_2 \quad - \text{ 3f. transformátor}$$

### Ztráty a účinnost:

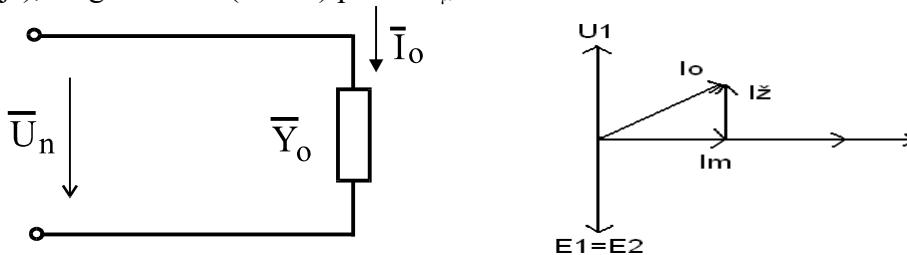
$$\text{Ztráty ve vinutí} \quad Z_{Cu} = R \cdot I^2 \quad [\text{kW}]$$

$$\text{Ztráty hysterezní a vířivými proudy} \quad Z_z \quad [\text{kW}] \approx \left( \frac{1}{4} \div \frac{1}{3} \div \frac{1}{2} \right) Z_{Cu}$$

$$\text{Účinnost} \quad \eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 = \frac{P_1 - Z_{Cu} - Z_z}{P_1} \cdot 100 = 100\% - Z_{Cu} \% - Z_z \% .$$

### Transformátor naprázdno:

Po připojení napětí na primární svorky (sekundár rozpojen) bere transformátor ze sítě (ze zdroje), magnetizační (budící) proud  $I_\mu$ .



obr.76

Sekundární napětí na obr.76 je přepočítané na primární stranu převodem transformátoru. Skutečný transformátor má ztráty. Na krytí těchto ztrát se spotřebuje činný proud  $I_z$ . Výsledný proud  $I_0$  se nazývá proud naprázdno a zjistí se měřením.

### Transformátor při zatížení

Sekundární strana je zatížena. Při zatížení vzniká na transformátoru úbytek napětí. Úbytek se skládá ze dvou částí: z ohmického  $U_r$  a jalového  $U_x$ . Ohmický úbytek  $U_r$  je způsoben proudem  $I$  průtokem přes činný odpor  $R$ . Jeho hodnota v % je:

$$u_r = \frac{I_1 \cdot R}{U_1} \cdot 100 = \frac{Z_{Cu}}{S} \cdot 100 \quad [\%] \quad \text{kde} \quad S = U_1 \cdot I_1 \rightarrow U_1 = \frac{S}{I_1}$$

Jalový úbytek  $U_x$  je způsoben rozptylovým tokem. Jeho hodnota v % se určí výpočtem. Celkový úbytek napětí je

$$\Delta u = u_r \cdot \cos \varphi \pm u_x \cdot \sin \varphi$$

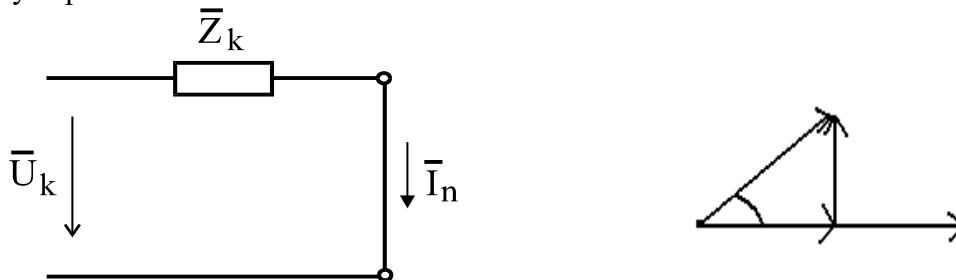
+ind  
-kap

### Transformátor nakrátko

Stav nakrátko transformátoru je podmíněn bezodporovým spojením sekundárních svorek, ovšem na rozdíl od zkratu je zdrojové napětí mnohem menší než napětí jmenovité a proud, který teče vinutím transformátoru má hodnotu proudu jmenovitého. Říkáme, že transformátor je v chodu nakrátko. V tomto stavu měříme napětí nakrátko  $u_k$ , které vyjádříme v procentech napětí jmenovitého.

$$u_k = \frac{Z \cdot I_{1n}}{U_{1n}} \cdot 100 \quad [\%]$$

Složky napětí nakrátko



obr.77

Spojením sekundárních svorek bez odporu při jmenovitém napětí vznikne zkrat. Při tom vzniká nárazový zkratový proud  $I_{kn}$  s hodnotou v nejnepříznivějším případě a s uvážením tlumení

$$I_{kn} = 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k,tr} \quad I_{k,tr} - \text{je trvalý zkratový proud}$$

Tento nárazový proud přechází na trvalý jehož hodnota je určena činným  $R$  a jalovým  $X$  odporem transformátoru. Obě tyto složky tvoří impedanci transformátoru nakrátko  $Z$ . Trvalý zkratový proud  $I_{k,tr}$  je:

$$I_{k,tr} = \frac{U_{1n}}{Z}$$

Vzhledem k malé hodnotě impedance  $Z$  je  $I_{k,tr}$  velmi velký a je nebezpečím pro transformátor. Hodnotu trvalého zkratového proudu určíme měřením napětí nakrátko  $u_k$ .



$$u_k = \frac{Z \cdot I_{1n}}{U_{1n}} \cdot 100$$

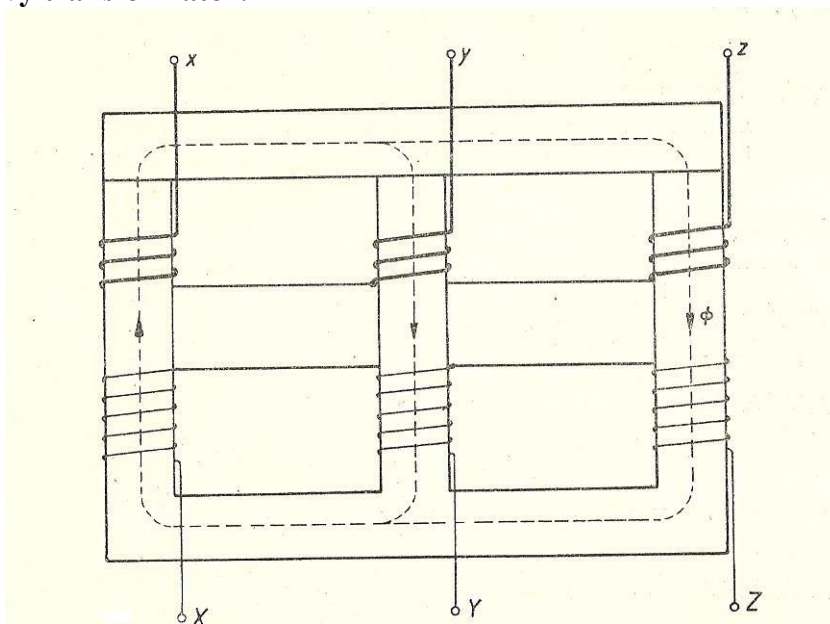
Tento vztah upravíme na:

$$I_{k,tr} = \frac{U_{1n}}{Z} = \frac{100}{u_k} \cdot I_{1n}$$

Ze vztahu pro jmenovitý výkon určíme jmenovitý proud  $I_{1n} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_{1n}}$  a po dosazení dostaneme trvalý zkratový proud

$$I_{k,tr} = \frac{U_{1n}}{Z} = \frac{100}{u_k} \cdot \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_{1n}}$$

**Trojfázový transformátor:**



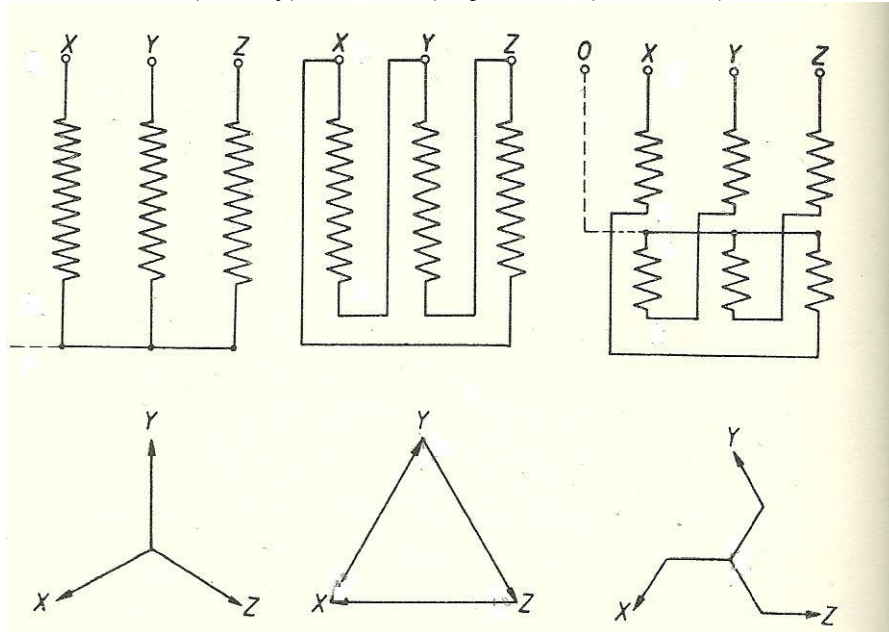
obr.78

Magnetické toky jsou sprážené a uzavírají se přes spojky a sloupy.

Při souměrném zatížení je součet toků nulový.

Rozlišujeme zapojení: Do Y (hvězdy), do  $\Delta$  (D) (trojúhelníku), do Z (lomené hvězdy)

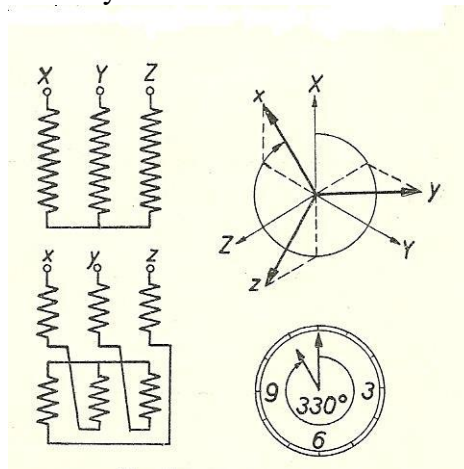
do Y (hvězdy) do Δ (trojúhelníku) do Z (lomené hvězdy)



obr.79

### Hodinový úhel

Hodinový úhel je posun fáze napětí mezi primárním a sekundárním vinutím stejné fáze. Fázový posun  $30^\circ$  se nazývá 1 hodinou. Různou kombinací zapojení ( Y , D , Z ) na začátku a konci vinutí lze dosáhnout 9 různých úhlů natočení.

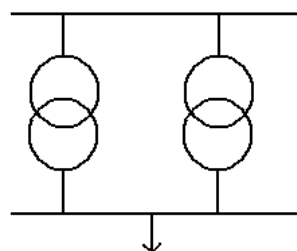


obr.80

Výkon 3f transformátoru

$$S = 3.U_f \cdot I = \sqrt{3} \cdot U_s \cdot I$$

### Paralelní spolupráce dvou transformátorů



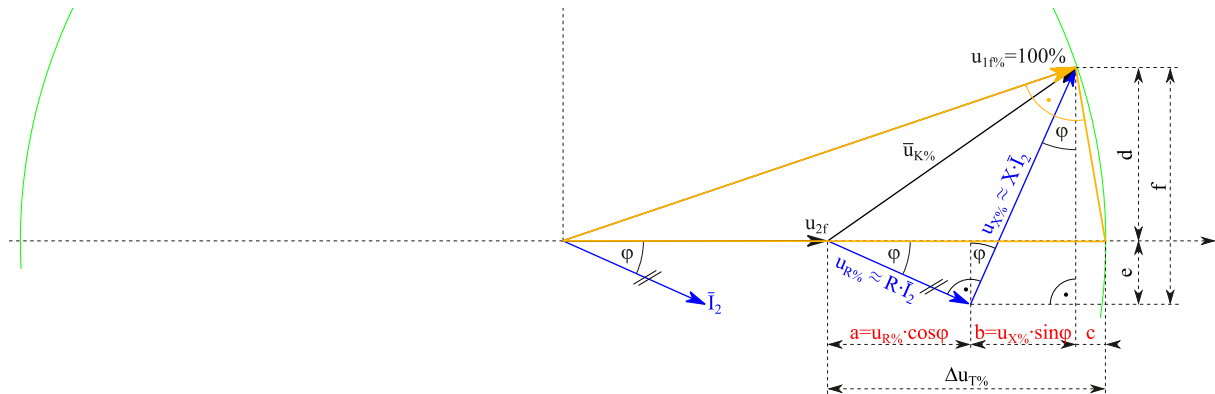
obr.81

Pro paralelní spojení dvou a více transformátorů musí být splněny tyto podmínky:

- 1) stejný převod napětí - procentní chyba mezi převody může být  $\Delta p = \pm 0,5\%$
- 2) stejné napětí nakrátko - procentní chyba mezi napětími může být  $\Delta u = \pm 10\%$
- 3) stejný hodinový úhel - tato podmínka musí být vždy splněna
- 4) stejný sled fází - tato podmínka musí být vždy splněna
- 5) přibližně stejné výkony - výkony mohou být rozdílné max. 1:3 ÷ 1:3,5

### Výpočet úbytku napětí na transformátoru

Předpoklad : Zanedbáme proud  $I_0$



Obr.82

$p'$  .....převodový poměr trať  $p' = \frac{U_2}{U_1 + x}$

$U_2$  .....napětí výstupní strany  
zahrnujeme vliv regulace napětí na vstupní straně pomocí regulačních odboček

$U_1$  .....napětí vstupní strany

Při zatížení transformátoru platí:

$$\overline{U}_2 = p' \cdot \overline{U}_1 - \Delta \overline{U}_T$$

Je-li  $\Delta U_T = 0$  (stav naprázdno) platí:

$$\overline{U}_2 = p' \cdot \overline{U}_1$$

$$a = u_r \% \cdot \cos \varphi_2$$

$$b = u_x \% \cdot \sin \varphi_2$$

Z Euklidovy věty pro pravoúhlý trojúhelník a z velké Tháletovy kružnice, kde je kvadrát výšky roven součinu úseků přepony:

$$d^2 = (200 - c) \cdot c$$

$$d^2 = 200 \cdot c - c^2 \approx 200 \cdot c \quad (\text{c je malé a proto } c^2 \text{ zanedbáme})$$

$$\text{Potom } c = \frac{d^2}{200} = \frac{(f - e)^2}{200}$$

$$f = u_x \% \cdot \cos \varphi_2 \quad ; \quad e = u_r \% \cdot \sin \varphi_2$$

Potom úbytek napětí na transformátoru:

$$\Delta u_T \% = u_{r\%} \cdot \cos \varphi_2 + u_{x\%} \cdot \sin \varphi_2 + \frac{(u_{x\%} \cdot \cos \varphi_2 - u_{r\%} \cdot \sin \varphi_2)^2}{200}$$

To platí pro  $I_n$  a induktivní zatížení.

Pro  $I_n$  a kapacitní zatížení (připadá pouze výjimečně) bude:

$$\Delta u_T \% = u_{r\%} \cdot \cos \varphi_2 - u_{x\%} \cdot \sin \varphi_2 + \frac{(u_{x\%} \cdot \cos \varphi_2 + u_{r\%} \cdot \sin \varphi_2)^2}{200}$$

Je-li  $u_k \leq 4\%$  potom je člen v kvadrátu malý a platí

$$\Delta u_T \% \cong u_{r\%} \cdot \cos \varphi_2 \pm u_{x\%} \cdot \sin \varphi_2$$

Pro hrubý odhad lze použít:

$$\Delta u_T \% \cong u_{x\%} \cdot \sin \varphi_2$$

Není-li transformátor zatížen jmenovitým zatížením, tedy  $S_x \neq S_n$ , potom zavádíme koeficient

$$k_x = \frac{S_x}{S_n} = \frac{I_x}{I_n} \quad \text{při } U_n = \text{konst.}$$

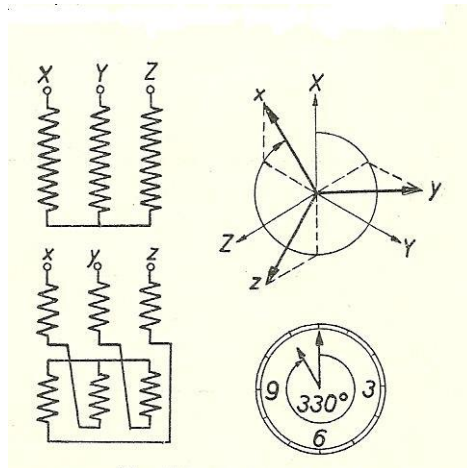
Obecný vztah pro úbytek napětí na transformátoru bude:

$$\Delta u_{T\%} = k_x (u_{r\%} \cdot \cos \varphi_2 \pm u_{x\%} \cdot \sin \varphi_2) + \frac{k_x^2 (u_{x\%} \cdot \cos \varphi_2 \mp u_{r\%} \cdot \sin \varphi_2)^2}{200}$$

## ZÁKLADNÍ PARAMETRY – ŠTÍTKOVÉ HODNOTY

$S_n$ [MVA]	- jmenovitý výkon
$u_k$ [%]	- napětí nakrátko
$i_0$ [%]	- proud nanaprázdko
$\Delta P_{cu}$ [kW]	- ztráty nakrátko ( $\Delta P_k$ )
$\Delta P_{Fe}$ [kW]	- ztráty naprázdno ( $\Delta P_0$ )

Zapojení vinutí např. Y z 11



Obr.83

**Převod trafa včetně regulace:**

a) regulační tr:  $p = 110 \pm 8 \times 2\% / 23 \text{ kV}$



b) neregulační tr.  $p = 22 \pm 5\% / 0.4$



**Řada jmenovitých výkonů:**

Trojfázové transformátory: (kVA)

0,75 ; 1 ; 1,6 ; 2 ; 2,5 ; 3,15 ; 4 ; 5 ; 6,3 ; 8 ; 10 ; 12,5 ; 16 ; 20 ; 25 ; 31,5 ; 40 ; 50 ; 63 ;  
dále  $\times 10$  ; 100 ; 1000 ; 10000

**Řada jmenovitých napětí:**

Vstupní strana: (kV)

(0,11) ; 0,22 ; (0,38); 400 ; 0,5 ; (3) ; 6 ; 10 ; (15) ; 22 ; 35 ; 110 ; 220 ; 400 ; 750

Paralelní chod transformátoru

Používá se s výhodou na př. při napájení elektrických sítí. Provozujeme na př. tři transformátory s parametry:

$S_1; S_2; S_3;$  ..... [kVA ; MVA]

$u_{k1} ; u_{k2} ; u_{k3} ;$  ..... [%]

Obvykle nelze tyto transformátory zatížit na součtový výkon  $S_{\Sigma} = S_1 + S_2 + S_3$  (s výjimkou stejných  $S$  a stejných  $u_k$ )

Zavádíme proto t.zv. skupinový výkon:

Předpokládáme, že transformátor s výkonem  $S_1$  má nejmenší napětí nakrátko  $u_{k1}\%$

$$S_{sk} = S_1 + S_2' + S_3' = S_1 + \frac{u_{k1}}{u_{k2}} \cdot S_2 + \frac{u_{k1}}{u_{k2}} \cdot S_3$$

Podle normy má být  $S_{sk} \geq 95\% \cdot S_{\Sigma}$ . To lze zajistit pro dva transformátory z důvodů  $\Delta u_k = \pm 10\%$

**Podmínky pro paralelní spolupráci**

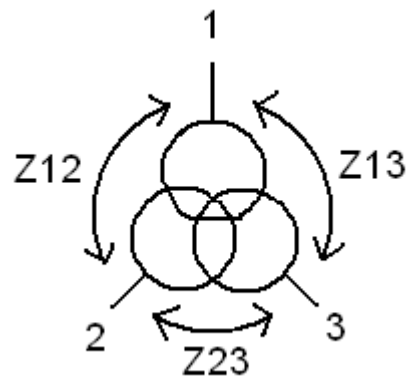
- 1) stejný převod  $p \pm 0,5\%$
- 2) stejné napětí nakrátko  $u_k \pm 10\%$
- 3) stejné hodinové číslo

- 4) stejný sled fází
- 5) stejné výkony
- ad 1)
- ad 2) při různém  $u_k$  netečnou vyrovnávací proudy, ale transformátor s menším  $u_k$  převezme větší část zatížení.
- ad 3) při rozdílném hodinovém čísle nelze provozovat, pouze v některých případech lze přepojením dosáhnout spolupráce

## TROJVINUŤOVÝ TRANSFORMÁTOR

Schematická značka transformátoru je uvedena na obr.85

Jmenovitý výkon  $S_n$  je největší z výkonů  $S_{n1}$ ;  $S_{n2}$ ;  $S_{n3}$  jednotlivých vinutí k němuž se vztahují procentní hodnoty impedancí.



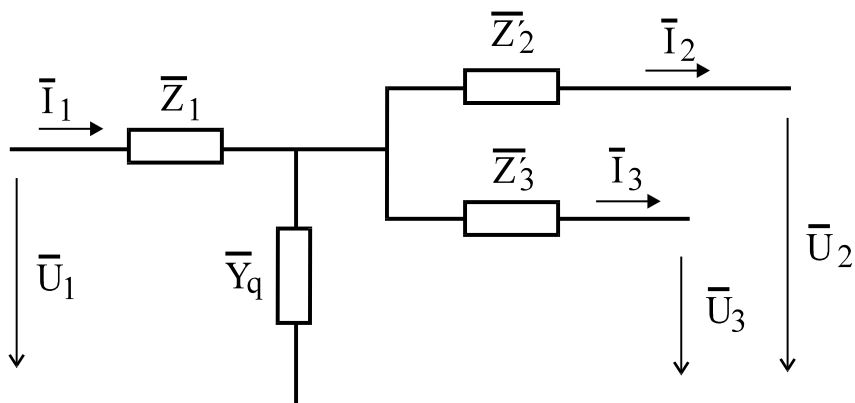
$$Z_{12} = \frac{u_{K12}}{100} \cdot \frac{U_{N1}^2}{S_N}$$

$$Z_{13} = \frac{u_{K13}}{100} \cdot \frac{U_{N1}^2}{S_N}$$

$$Z_{23} = \frac{u_{K23}}{100} \cdot \frac{U_{N1}^2}{S_N}$$

obr.84

Náhradní schéma transformátoru je uvedeno na obr.85

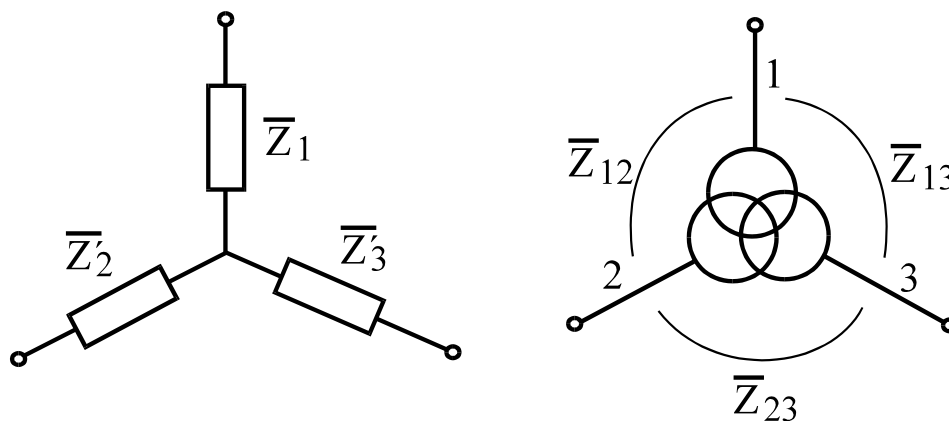


Obr.85

$$\bar{Z}_1 = R_1 + jX_{\sigma 1}$$

$$\bar{Z}_2 = R_2' + jX_{\sigma 2}'$$

$$\bar{Z}_3 = R_3' + jX_{\sigma 3}'$$



$$\bar{Z}_1 = \frac{\bar{Z}_{13} + \bar{Z}_{12} - \bar{Z}_{23}}{2}; \bar{Z}_2 = \frac{\bar{Z}_{12} + \bar{Z}_{23} - \bar{Z}_{13}}{2}; \bar{Z}_3 = \frac{\bar{Z}_{13} + \bar{Z}_{23} - \bar{Z}_{12}}{2}$$

obr.86

## ZKRATY

Zkratem rozumíme vodivé spojení fází nebo spojení jedné fáze se zemí. Impedance tohoto spojení je téměř rovna nule při kovovém dotyku (dokonalý zkrat) nebo může být relativně velká při spojení obloukem. Za zkrat považujeme všechna spojení, která musí být okamžitě odpojena ochranou.

Existují i spojení, která se nemusí ihned odpojit od sítě a obvykle stačí je-li takové spojení obsluhuje signalizováno. Takovému spojení říkáme zemní a může se vyskytnout pouze v soustavě s izolovaným uzlem nebo s uzlem kompenzovaným. Jsou-li ovšem v takového soustavě se zemí spojeny dvě různé fáze a to i na různých místech, jde opět o zkrat.

Nepříznivé účinky zkratu:

- a) nadměrné oteplení zařízení
- b) nadměrné silové namáhání různých částí zařízení
- c) výpadek synchronních strojů z paralelního chodu
- d) znemožnění řádného chodu spotřebičů (zejména motorů)
- e) rušení sdělovacích cest
- f) poruchy izolace přepětím.

Druhy zkratů:

V trojfázové síti může nastat:

Souměrný zkrat – při kovovém dotyku všech tří fází navzájem (trojfázový zkrat). Nastane-li současně v místě zkratu spojení se zemí ať již kovové nebo přes impedanci, jde rovněž o souměrný zkrat (trojpólový zemní). U takového zkratu nejde spojení se zemí žádný proud a výpočet se provádí stejně jako u trojpólového zkratu.

Všechny ostatní druhy zkratu jsou nesouměrné.

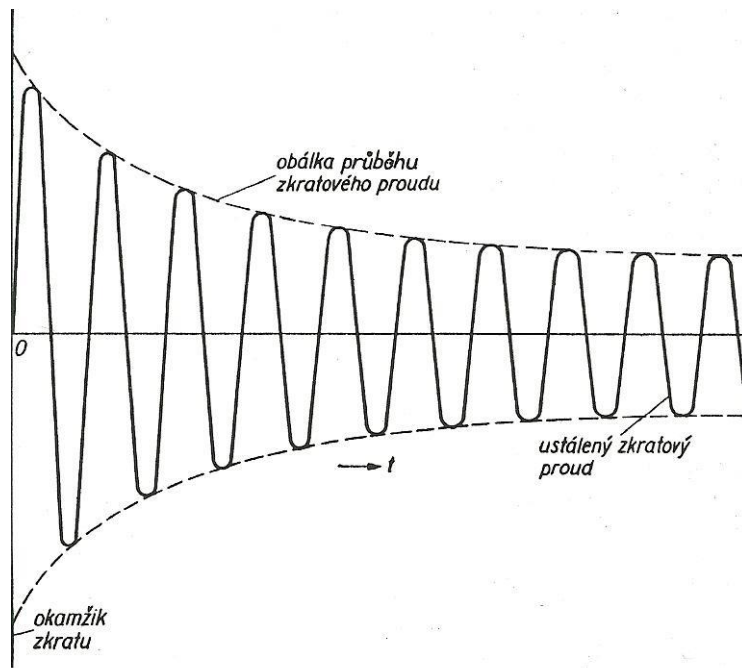
Nejdůležitější jsou:

- a) dvoupólový zemní - spojení dvou různých fází a země
- b) dvoupólový - při prostém spojení dvou různých fází
- c) jednopólový - při spojení jedné fáze se zemí u soustavy s uzemněným uzlem

Současné zkraty různého druhu na různých místech se nazývají simultanní. Z nich nejčastější je dvojitý zemní zkrat, při spojení dvou různých fází se zemí na dvou různých místech sítě. Různé druhy zkratů nejsou stejně pravděpodobné. V sítích vn venkovních je asi 65% zemních spojení (sítě izolované nebo kompenzované), 20% dvoupólových zemních, 10% dvoupólových, 5% trojpólových. V sítích vn ČR je to 65% zemních spojení, 15 % dvoupólových zemních a dvoupólových, 6% dvojitých zemních, 14 % trojpólových zemních. Čím vyšší je hladina napětí, čím více převládají zkraty jednopólové asi 90%. V kabelových sítích je nejvíce zkratu trojpólových, protože oblouk vzniklý při jakémkoliv zkratu snadno poruší izolaci mezi fázemi. Neoznačí-li se druh zkratu rozumí se zpravidla zkrat trojpólový.

Časový průběh zkratu.

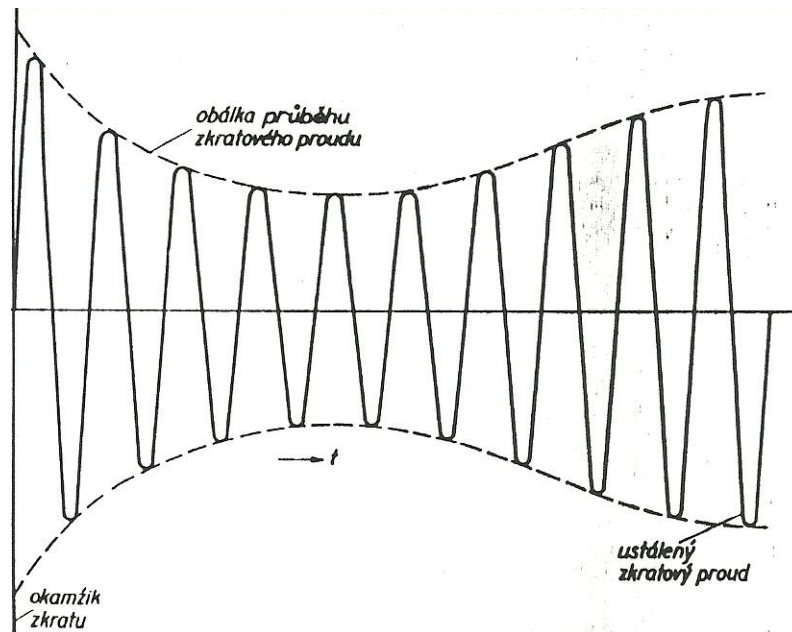
V soustavě napájení z alternátoru má zkratový proud charakteristický průběh. Je složený obecně ze zanikající složky střídavé a se zanikající složky stejnosměrné. Složka střídavá přejde nakonec v tzv. ustálený zkratový proud určité velikosti a stejnosměrná složka úplně zanikne. Průběh zkratového proudu závisí na tom, zda alternátory mají nebo nemají regulátory napětí.



obr.87

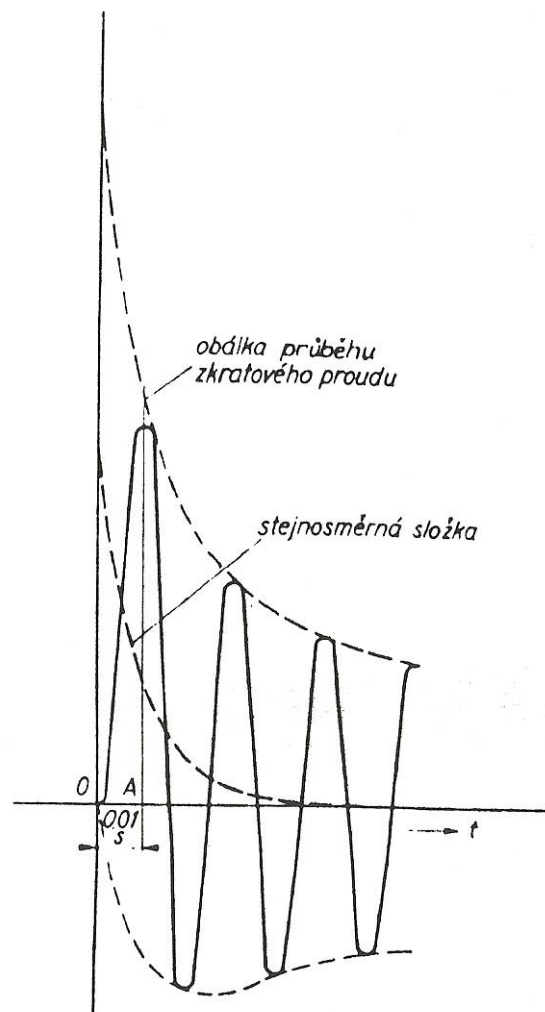
Jsou-li alternátory opatřeny regulátory napětí, je průběh uveden na obrázku obr.88





obr.88

Na obou horních obrázcích je uveden případ (idealizovaný), kdy nevznikla stejnosměrná složka. Na obr.89 je uveden průběh zkratu se stejnosměrnou složkou. Je vidět, že vlivem ss složky je průběh zkratového proudu vychýlen z osy.

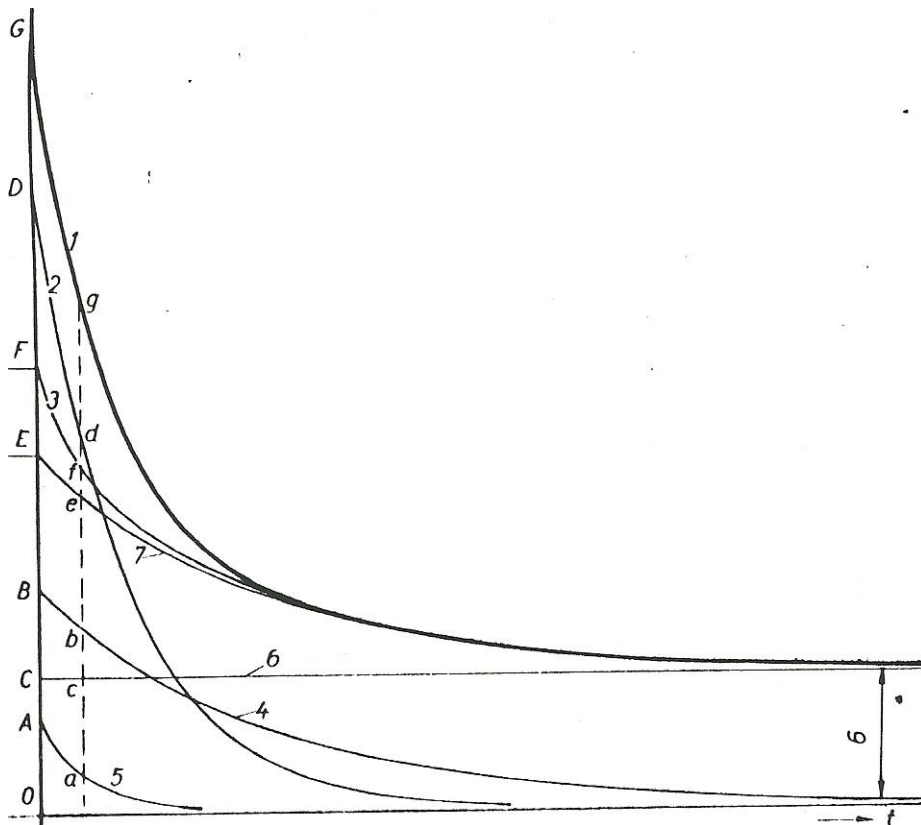


obr.89

Za efektivní hodnotu střídavé složky se v praxi považuje okamžitá pořadnice obálky skutečného průběhu této složky dělená  $\sqrt{2}$ . Přesně je to kvadratický průměr za jednu periodu, je-li uvažovaný okamžik uprostřed ní .

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_{t-\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}} i^2 dt}$$

Kde je  $i$  okamžitá hodnota proudu a  $T$  je délka periody. Efektivní hodnota stejnosměrné složky se v každém okamžiku rovná její skutečné hodnotě.



obr.90

Výpočet provádíme pomocí skutečných a poměrných hodnot jako t výpočet zběžný a výpočet přesný. V zběžném zanedbáme odpory.

Postup:

- 1) Nakreslíme schéma sítě
- 2) Do schéma vyznačíme všechny hodnoty napětí, reaktancí, .....
- 3) Všechny reaktance (parametry) přepočteme na jednu hladinu napětí. S výhodou na napětí kde počítáme zkratové poměry.
- 4) Nakreslíme náhradní schéma se všemi reaktancemi
- 5) Provedeme zjednodušení k místu zkratu
- 6) Vypočteme zkratový proud.

Příklad: Skutečné hodnoty