

– Výpočet stejnosměrných sítí

– Základní podmínky výpočtu

Při výpočtech elektrických stejnosměrných sítí bude uvažován pouze jeden parametr vedení a to činný odpor R . Jedná se o případ dvou vodičového vedení (úbytek napětí se vytváří v obou vodičích). Při výpočtu budou respektovány následující zjednodušující předpoklady :

- materiály i průřezy jednotlivých vodičů jsou stejné,
- odebraný výkon nezávisí na úbytku napětí,
- určení odběrových proudů spotřebičů z příkonů se provádí za předpokladu jmenovitých napětí.

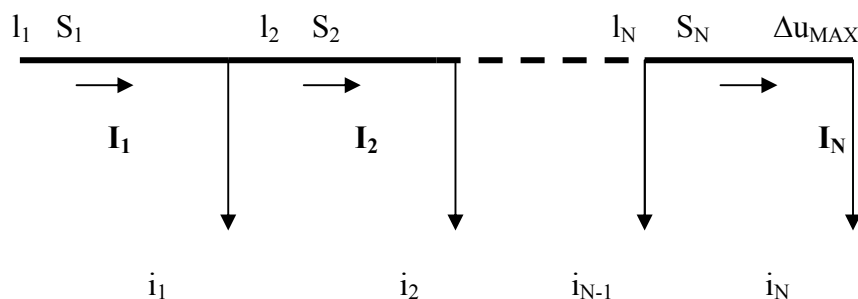
Pro počítanou síť je dáno :

- konfigurace sítě s odběrovými výkony nebo proudy,
- jmenovité napětí,
- dovolený úbytek napětí.

Výpočtem je nutno stanovit :

- průřez vedení,
- maximální úbytek napětí,
- výkonové ztráty.

Základní schéma vedení je na obr. 4.1. Jedná se o vedení, které je napájeno z jedné strany a má několik odběrů. U tohoto typu vedení je jasné, že místo maximálního úbytku napětí je na konci vedení.



Obr. 4. 1

(l_X je délka úseku vedení, I_X je celkový proud v úseku vedení.)

Pro maximální hodnotu úbytku napětí platí vztah :

$$\Delta u_{MAX} = R_1 I_1 + R_2 I_2 + \dots + R_N I_N = \rho \frac{2l_1}{S_1} I_1 + \rho \frac{2l_2}{S_2} I_2 + \dots + \rho \frac{2l_N}{S_N} I_N \quad (4.1)$$

$$\Delta u_{MAX} = 2 \rho \sum_{K=1}^N \frac{l_K}{S_K} I_K \quad (4.2)$$

To jsou základní rovnice pro výpočet úbytku napětí u stejnosměrných sítí.

– Metoda konstantního průřezu

Tato metoda je pro výpočet sítí (nejen stejnosměrných) používána nejčastěji. Základní pravidlo této metody je obsaženo v jejím názvu, tedy $S = \text{konst.}$

Pro maximální hodnotu úbytku napětí (obr. 4.1) platí následující vztahy :

$$\Delta u_{MAX} = 2 \frac{\rho}{S} \sum_{K=1}^N l_K I_K \quad (4.3)$$

$$\Delta u_{MAX} = 2 \frac{\rho}{S} [l_1 (i_1 + i_2 + \dots + i_{N-1} + i_N) + l_2 (i_2 + \dots + i_{N-1} + i_N) + l_N i_N] \quad (4.4)$$

$$\Delta u_{MAX} = 2 \frac{\rho}{S} [i_1 l_1 + i_2 (l_1 + l_2) + \dots + i_N (l_1 + l_2 + \dots + l_N)] \quad (4.5)$$

Výraz $\sum_{K=1}^N l_K I_K = M_K$ se označuje jako tzv. proudový moment. Jak vyplývá ze vztahů 4.4 a 4.5 lze proudový moment vypočítat dvěma způsoby. První způsob vyjádření je jako součet součinů délek jednotlivých úseků a proudů, které tečou těmito úseky. Druhý způsob vyjádření je jako součet součinů proudů jednotlivých úseků a vzdáleností odběrů od začátku vedení.

Pro výpočet průřezu vedení z hodnoty dovoleného úbytku napětí pak platí :

$$S = \frac{2 \rho}{\Delta u_{\text{Dov}}} M_K \quad [\text{mm}^2; \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}; \text{V}; \text{A} \cdot \text{m}] \quad (4.6)$$

Ve vztahu 4. 6 je hodnota dovoleného úbytku napětí udána ve voltech, někdy je ovšem udávána v procentech jmenovitého napětí. Pak vztah pro průřez vedení má následující tvar :

$$S = \frac{200 \rho}{\Delta u_{\%} U} M_K \quad (4.7)$$

U ... jmenovité napětí sítě [V]

Pro výkonové ztráty platí :

$$\Delta P = \frac{2 \rho}{S} \sum_{K=1}^N I_K I_K^2 \quad [\text{W}; \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}; \text{mm}^2; \text{m}; \text{A}] \quad (4.8)$$

Metoda konstantního průřezu je velmi jednoduchá metoda výpočtu. Nevýhodou této metody je, že na celé vedení je vypočítán jeden průřez vodiče, který není po celé délce (zvláště na konci vedení) proudově využit. Tuto nevýhodu lze kompenzovat, několikerým použitím této metody, takže na koncích vedení a na odbočkách je vypočtena jiná hodnota průřezu vedení.

Vypočtené hodnoty průřezu se zaokrouhlují na neblížeší vyšší průřez z řady průřezů daného vedení.

– Metoda konstantní proudové hustoty

Jak vyplývá z názvu této metody, je v každém úseku vedení stejná proudová hustota σ .

$$\sigma = \frac{I_1}{S_1} = \frac{I_2}{S_2} = \frac{I_N}{S_N} = \text{konst.} \quad (4.9)$$

Pro maximální hodnotu úbytku napětí platí :

$$\Delta u_{\text{MAX}} = 2 \rho \sum_{K=1}^N \frac{I_K}{S_K} I_K = 2 \rho \sigma \sum_{K=1}^N I_K = 2 \rho \sigma L \quad (4. 10)$$

L ... celková délka vedení [m]

Pro výslednou proudovou hustotu pak platí :

$$\sigma = \frac{\Delta u_{\text{DOV}}}{2 \rho L} \quad [\text{A.mm}^{-2}; \text{V}; \Omega.\text{mm}^2.\text{m}^{-1}; \text{m}] \quad (4. 11)$$

Průřez každého úseku vedení je jiný podle hodnoty proudu, který daným úsekem protéká :

$$S_K = \frac{I_K}{\sigma} \quad (4. 12)$$

Pro výkonové ztráty platí :

$$\Delta P = 2 \rho \sum_{K=1}^N \frac{I_K I_K^2}{S_K} = 2 \rho \sigma \sum_{K=1}^N I_K I_K = 2 \rho \sigma M_K \quad [\text{W}; \Omega.\text{mm}^2.\text{m}^{-1}; \text{A.mm}^{-2}; \text{A.m}]$$

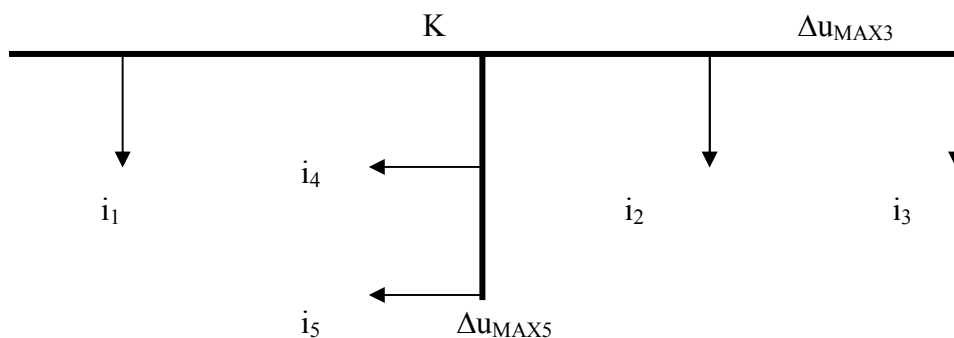
(4. 13)

Vedení navržené podle této metody má ve všech úsecích ideální proudové využití průřezu, vznikají minimální výkonové ztráty. Nevýhodou této metody je ale technické řešení, které by bylo podle této metody vypočteno. Každý úsek vedení by měl jiný průřez, což vyžaduje jištění každého úseku vedení a množství druhů instalačního materiálu.

Aby byl v praxi využit efekt minima ztrát, musely by být jednotlivé proudové odběry konstantní.

– Řešení vedení s odbočkami

Při řešení tohoto typu vedení se obvykle několikrát aplikuje metoda konstantního průřezu. Základem této metody je stanovení tzv. kmenového vedení. Příklad takového druhu sítě je na obr. 4.2.



Obr. 4. 2

V každém místě odbočení (postupuje se od konce vedení) se stanoví, která odbočka má větší hodnotu úbytku napětí. Protože se předpokládá metoda konstantního průřezu, stanoví se, která větev má větší hodnotu proudového momentu M_K . Větev, která má větší hodnotu proudového momentu, se zachová, větev s menší hodnotou proudového momentu se nahradí odběrem v místě odbočení. Hodnota odběrného proudu (výkonu) je rovna součtu všech odběrných proudů (výkonů) větve, která se nahrazuje. (Výsledný proudový odběr řešené sítě se po redukci větví nesmí změnit.) Tak se získá tzv. kmenové vedení, což je vedení napájené s jedné strany s několika odběry. Toto kmenové vedení se řeší postupem dle kap. 4.2.

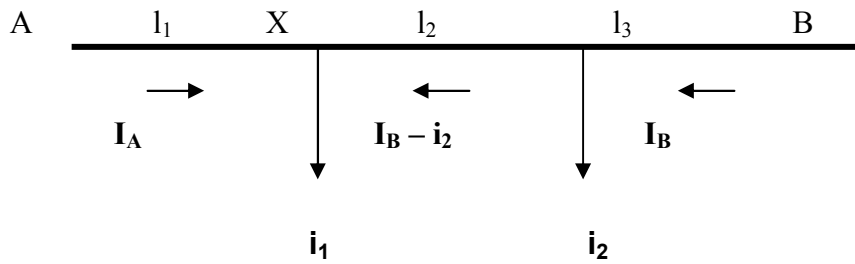
Vypočte se průřez kmenového vedení. Odbočky se mohou dimenzovat stejným průřezem. Většinou se ale odbočky dimenzují zvlášť. Vypočte se skutečná hodnota úbytku napětí v místě odbočení Δu_K . Pro danou odbočku se pak vypočte hodnota dovoleného úbytku napětí $\Delta u'_{DOV} = \Delta u_{DOV} - \Delta u_K$. Na tuto hodnotu dovoleného úbytku napětí se pak dimenzuje daná odbočka.

V případě sítě na obr. 4.2 se stanoví proudový moment mezi body K3 a K5 a určí se kmenové vedení. Např. proudový moment $K3 > K5$, pak je kmenové vedení tvořeno stávajícími odběry i_1 , i_2 a i_3 ; v místě odbočení K pak odběrem $(i_4 + i_5)$.

– Vedení napájené ze dvou stran

V případě takového typu vedení je opět nutno nejdříve určit místo maximálního úbytku napětí. Pro jeho určení je nutno vypočítat napájecí proudy. Předpokladem je opět hodnota konstantního průřezu a dále se předpokládá stejné napětí obou napáječů.

Pro odvození vztahů pro výpočet napájecích proudů bude použito jednoduché schéma vedení napájeného ze dvou stran se dvěma odběry (obr. 4.3).



Obr. 4. 3

Pro úbytek napětí v bodě **X** (stejná hodnota musí být od napáječe **A** i **B** za předpokladu stejných napájecích napětí) platí následující vztah :

$$\Delta u_X = \rho \frac{l_1}{S} I_A = \rho \frac{l_2}{S} (I_B - i_2) + \rho \frac{l_3}{S} I_B \quad (4. 14)$$

Za předpokladu konstantního průřezu platí :

$$l_1 I_A = l_2 I_B - l_2 i_2 + l_3 I_B \quad (4. 15)$$

$$I_B = -I_A + i_1 + i_2 \quad (4. 16)$$

Po úpravě platí pro napájecí proud **I_A** a analogicky pro napájecí proud **I_B** následující vztahy :

$$I_A = \frac{i_1 (l_2 + l_3) + i_2 l_3}{l_1 + l_2 + l_3} \quad (4. 17)$$

$$I_B = \frac{i_1 l_1 + i_2 (l_1 + l_2)}{l_1 + l_2 + l_3} \quad (4. 18)$$

Tyto vztahy lze zobecnit :

$$I_A L = \sum_{X=1}^N i_X l_{XB} \qquad I_B L = \sum_{X=1}^N i_X l_{XA} \quad (4.19)$$

- L ... délka vedení mezi napáječi **A B**
 l_{XA} ... délka vedení odběru **X** od napáječe **A**
 l_{XB} ... délka vedení odběru **X** od napáječe **B**

Po výpočtu napájecích proudů se určí rozložení proudů v síti. Odběr, do kterého se stékají proudy z obou stran je místem maximálního úbytku napětí. V tomto bodě se vedení rozdělí na dvě vedení, které jsou napájeny z jedné strany.

Celý postup výpočtu lze vyjádřit v následujících bodech :

A. $U_A = U_B$

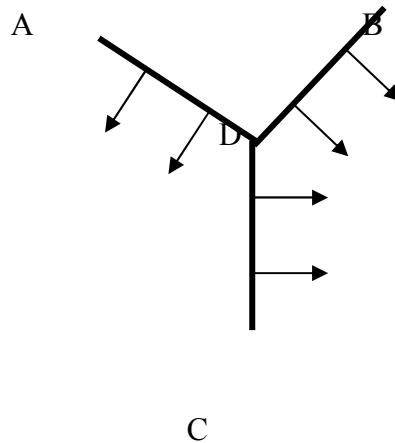
- Výpočet napájecích proudů,
- rozdělení proudů,
- určení místa maximálního úbytku napětí,
- rozdělení na dvě vedení napájené z jedné strany,
- dimenzování průřezu jednoho z nich (vypočtený průřez musí být u obou vedení stejný).

B. $U_A \neq U_B$ (v tomto případě proběhne výpočet stejně jako v předchozím případě, ale musí se doplnit následujícími body).

- Určení vyrovnávacího proudu $I_V = (U_A - U_B) \frac{S}{2 \rho L}$,
- stanovení nového rozdělení proudů (I_V se připočte k napájecímu proudu napáječe s vyšším napětím a odečte se od napájecího proudu napáječe s nižším napětím),
- v místě maximálního úbytku napětí se vedení rozdělí a zkontroluje se hodnota úbytku napětí,
- v případě, že je hodnota úbytku napětí vyšší než hodnota dovolená, zvýší se průřez o jeden stupeň a znova se provede výpočet **B**.

– Vedení napájené ze tří (a více) stran

Tento typ vedení je znázorněn na obr. 4.4.



Obr. 4. 4

U tohoto typu elektrické sítě mohou nastat dva základní případy podle toho, zda je bod **D** bodem napájecím, či nikoli.

V případě, že je bod **D** bodem napájecím, je možno uvedené vedení rozdělit na tři vedení, kdy každé z nich je napájeno ze dvou stran.

V opačném případě (bod **D** není napájecí) je nutno vypočítat napájecí proudy podle následující metodiky.

Za předpokladu rovnosti napájecích napětí, platí rovnost proudových momentů k bodu **D** od jednotlivých napáječů :

$$I_A L_{AD} - \sum_D i_{AX} l_{XD} = I_B L_{BD} - \sum_D i_{BX} l_{XD} = I_C L_{CD} - \sum_D i_{CX} l_{XD} \quad (4. 20)$$

Dále platí :

$$I_A + I_B + I_C = \sum i \quad (4. 21)$$

Z těchto rovnic lze vypočítat hodnotu napájecích proudů I_A , I_B , I_C . Pak se provede rozdělení proudů a obdobně jako v případě vedení napájeného ze dvou stran se určí místo (nebo místa) maximálního úbytku napětí. V těchto bodech se

vedení rozpojí a řeší se průřez jednotlivých částí vedení (jedná se již o vedení napájená z jedné strany).

Je-li $U_A \neq U_B \neq U_C$, je nutno stejně jako u vedení napájených ze dvou stran určit vyrovnávací proudy, dále nové rozdělení proudů a místa maximálního úbytku napětí. V případě překročení dovoleného úbytku napětí, se průřez zvětší o stupeň a znova se vypočtou vyrovnávací proudy a zkontroluje se hodnota úbytku napětí v místech odběrů, kde se stékají proudy ze dvou stran.

Obdobně se řeší sítě napájené z více stran, které mají jeden společný nenapájecí bod (hvězdicové sítě).

– Výpočet uzlových sítí

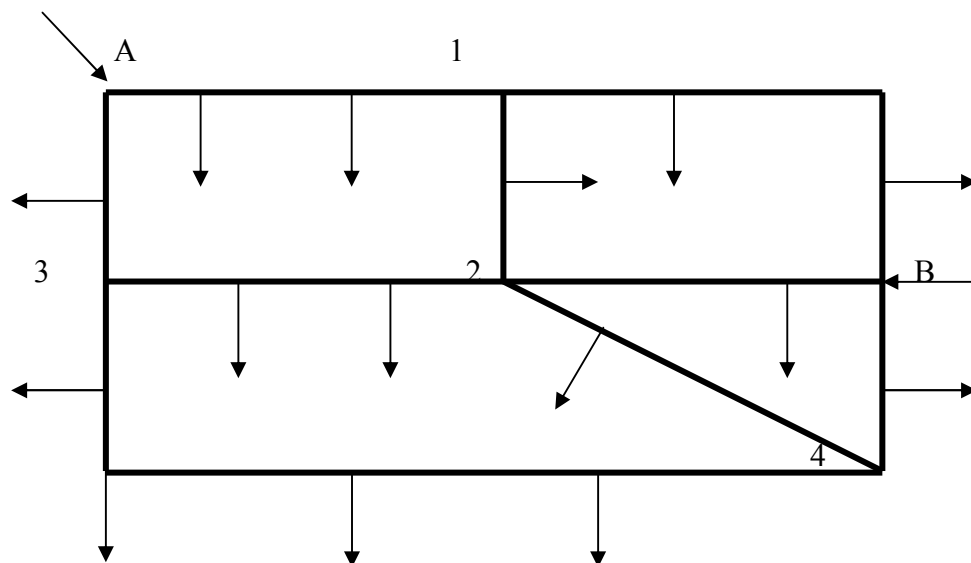
Při výpočtu uzlových sítí je zadáno následující :

- konfigurace sítě včetně délek, materiálu a průřezu vodičů,
- odběry v jednotlivých bodech.

Výpočtem se pak stanoví :

- zatížení jednotlivých napáječů (proudové nebo výkonové),
- zatížení jednotlivých větví,
- napětí (úbytky napětí) v jednotlivých uzlech,
- místo (nebo místa) maximálního úbytku napětí,
- výkonové ztráty,
- většinou se řeší i tzv. havarijní stav po výpadku jednoho či více napáječů.

Postup výpočtu bude vysvětlen na následujícím příkladě (obr. 4.5).



Obr. 4. 5

Řešení vychází z metody uzlových napětí. Uvedená síť má dva napájecí uzly (A,B) a čtyři nenapájecí uzly (1-4). Nejdříve je nutno provést redukci všech odběrů do sousedních uzlů. Redukce se vlastně provádí tak, že každá větev vlastně tvoří vedení napájené ze dvou stran a stanoví se její napájecí proudy. V každém uzlu se tyto redukované proudy sečtou. Celkový proud v uzlu je tedy dán odběrem v uzlu (pokud existuje) a součtem redukovaných proudů do uzlu.

Pro proud v uzlu **1** z obr. 4.5 je možno napsat následující rovnici :

$$I_1 = (U_A - U_1)g_{A1} + (U_B - U_1)g_{B1} + (U_2 - U_1)g_{21} \quad (4. 22)$$

U_X ... napětí v uzlu **X** [V]
 g_{XY} ... vodivost větve mezi uzly **X** a **Y** [S]

Pro vztah napětí a úbytku napětí v uzlech sítě je dán :

$$U_K - U_L = (U - \Delta U_K) - (U - \Delta U_L) = \Delta U_L - \Delta U_K \quad (4. 23)$$

S použitím vztahu 4.28 a za předpokladu, že v napájecích bodech je jmenovité napětí tzn., že úbytek napětí v těchto bodech je roven nule, má vztah pro proud uzlu **1** tvar :

$$I_1 = \Delta U_1 (g_{1A} + g_{1B} + g_{12}) - \Delta U_2 g_{12} = \Delta U_1 G_1 - \Delta U_2 g_{12} \quad (4. 24)$$

ΔU_X ... úbytek napětí v uzlu **X** [V]
 G_X ... vlastní vodivost uzlu **X** (součet vodivostí všech větví, které do uzlu **X** vstupují) [S]

Je možno sestavit soustavu rovnic pro proudy ve všech nenapájecích uzlech sítě dle obr. 4.5:

$$I_1 = \Delta U_1 G_1 - \Delta U_2 g_{12}$$

$$I_2 = \Delta U_2 G_2 - \Delta U_1 g_{12} - \Delta U_3 g_{23} - \Delta U_4 g_{24}$$

$$I_3 = \Delta U_3 G_3 - \Delta U_2 g_{23} - \Delta U_4 g_{34}$$

$$I_4 = \Delta U_4 G_4 - \Delta U_2 g_{24} - \Delta U_3 g_{34}$$

(4. 25)

Vyřešením soustavy rovnic 4.25 budou známy úbytky napětí v jednotlivých nenapájecích uzlech dané sítě.

Soustavu rovnic 4.25 lze zobecnit na tvar :

$$I_1 = \Delta U_1 G_1 - \Delta U_2 g_{12} - \dots - \Delta U_N g_{1N}$$

$$I_2 = -\Delta U_1 g_{21} + \Delta U_2 G_2 - \dots - \Delta U_N g_{2N}$$

·
·
·

$$I_N = -\Delta U_1 g_{N1} - \Delta U_2 g_{N2} \dots + \Delta U_N G_{NN}$$

(4.26)

Není-li mezi danými uzly větev, je vodivost mezi uzly nulová a daný člen ze soustavy rovnic vypadne.

Postup při řešení uzlových sítí lze formulovat do následujících bodů :

- A. Jednotlivé odběry se redukuje do uzlů.
- B. Sestaví se uzlové rovnice (viz. 4.26)
- C. Řešením soustavy rovnic se vypočtou hodnoty úbytků napětí v nenapájecích uzlech.
- D. Stanoví se rozdělení proudů, proudy v jednotlivých větvích jsou dány součtem vyrovnávacích proudů (vypočteno podle úbytků napětí uzlů a vodivosti větve) a redukováných proudů do uzlů.
- E. Vypočte se hodnota úbytku napětí v odběrech, kde se stékají proudy ze dvou stran, a porovná se s dovolenou hodnotou úbytku napětí.
- F. Vypočte se zatížení jednotlivých napáječů.
- G. Vypočte se hodnota elektrických ztrát.

Pozn. V kapitolách 4.5 – 4.7 bylo uvažováno s tzv. přirozeným rozdělením proudů (výkonů). Znamená to, že každý napáječ měl možnost dodat do sítě potřebný výkon. V případě, že by zdroj (napáječ) neměl dostatečný výkon (byl proudově omezen), musely by dodat do sítě tento výkon ostatní zdroje. Pak dochází k tzv. umělému rozdělení proudů (výkonů), které je charakterizováno výšením elektrických ztrát.