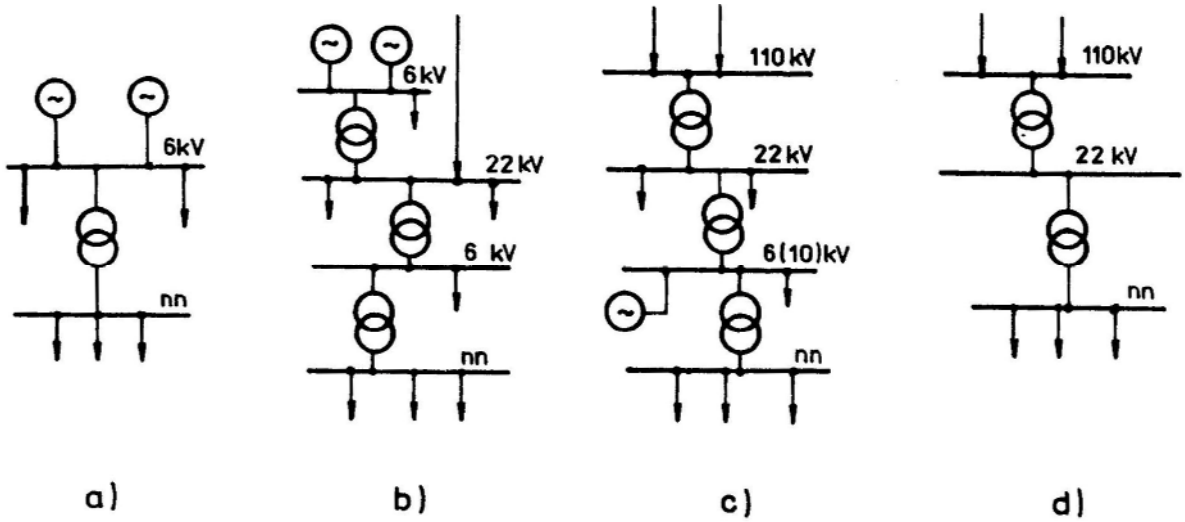
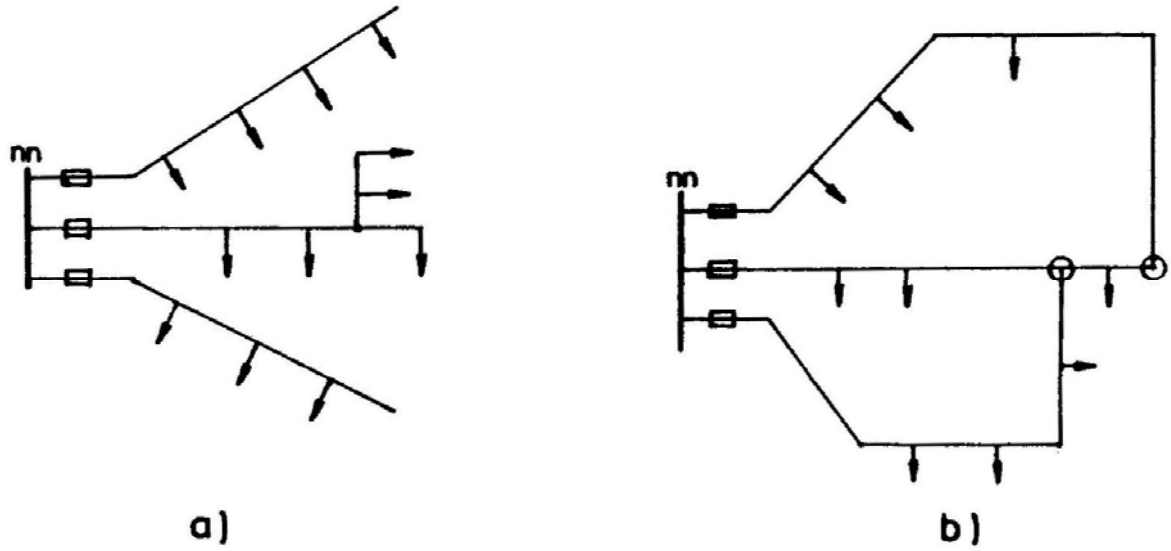
Městské sítě

Sítě vysokého napětí jsou ve městech vesměs realizovány kabely, zatímco u venkovských sítí se všeobecně prosadilo 22 kV (s malými výjimkami), rozvoj městských kabelových sítí byl podmíněn technologickými možnostmi výroby kabelů a hodnotou zatížení v městských aglomeracích. Proto se u nás napětí kabelových sítí postupně zvyšuje. Z původních sítí 3 kV se přešlo na 6 kV, v současné době se přechází na 10 kV a 22 kV. Jelikož se nové napěťové stupně zavádějí dříve, než staré dožijí, objevují se v městských aglomeracích sítě s několika stupni napětí vn, jak je nakresleno na obr. 1.



Obr. 1

Na (obr. 1a) je naznačeno nejjednodušší schéma pro první stupeň vývoje elektrizace. V dalším stupni rozvoje se objevovali tři, čtyři a u velkých měst i pět stupňů napětí (obr. 1b,c). Modernější koncepcí dochází opět k zjednodušování sítí (obr. 1d)



Obr. 2

Z hlediska provedení se započalo s budováním paprskových radiálních sítí nn (obr. 2a). Každý vývod z rozvodny je samostatný a není možné jej zálohovat. Tento způsob rozvodu je laciný, ale zajišťuje malou spolehlivost dodávky. Při poruchách může být přerušení dodávky dosti dlouhé (několik hodin i déle).

Postupným zahušťováním odběru se sítě zahušťovaly a vznikaly sítě okružní (obr. 2b). Jednotlivé paprsky sítí jsou vedeny tak, aby se daly navzájem propojit. Sítě jsou obvykle provozovány jako paprskové, ale při poruše v některém úseku lze velice rychle (ručně nebo automaticky) zajistit náhradní napájení. Další výhodou je možnost rovnoměrnějšího rozdělení zatížení na jednotlivé vývody.

Další zvyšování zatížení vedlo k budování zauzlených sítí, kdy síť je tvořena několika oky a vyskytuje se i více napáječů. Spojovací vedení mezi napáječi se často jistí tzv. pojistkami slabé vazby, nejlépe v místě kritického průřez (nejméně zatížená část) s poloviční jmenovitou hodnotou hlavních pojistek. Při poruše reaguje nejdříve pojistka slabé vazby a pak pojistka v hlavní stanici, čímž se odpojí jen část porušeného vedení.

Ve všech městech lze provádět mřížové sítě, kde je několik transformoven napájeno více napáječi vn. Kabelové vedení nn je v uzlech jištěno s pojistkami s pomalou charakteristikou o stejné hodnotě, což zajišťuje vysokou selektivitu jištění sítě. Mřížové sítě zajišťují lepší využití transformátoru a vedení, zlepšení kvality napájení, zmenšení ztrát v sítích. Nevýhodou mřížových sítí je zvětšení zkratových výkonů v síti nn a vznik tzv. zpětných napětí při poruchách

Určení zatížení městských sítí:

Při návrhu elektrických sítí patří k základním podkladům údaje o spotřebě elektrické energie v dané oblasti, a to nejen současný stav, ale i výhled s ohledem na životnost navrhované elektrické sítě. Síť navrhujeme na dobu 30 – 40 let. Některé části lze měnit obtížně (průřezy vodičů), některé lze v průběhu doby doplňovat (transformační stanice). Proto se provede hospodárný návrh elektrické sítě na předpokládané zatížení v polovině doby životnosti.

Při stanovení potřebného příkonu v určité napájené oblasti se využívá některých příznivých jevů, zejména toho, že nevyužívají svůj instalovaný výkon trvale a některé spotřebiče nepracují současně.

Součinitel náročnosti β - poměr maximálního odběru v určitém časovém období, např. v roce, u určitého odběratele, nebo skupiny odběratelů k součtu příkonů všech spotřebičů bez ohledu na to, jsou-li v provozu (přípojná hodnota).

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

Dle ČSN 34 1620 lze součinitel náročnosti stanovit takto:

$$\beta = \frac{k_s \cdot k_z}{\eta_m \cdot \eta_s}$$

kde **k_s** - součinitel současnosti (poměr jmenovitých výkonů spotřebičů, které jsou současně v chodu, k instalovaným výkonům všech spotřebičů)

k_z - součinitel využití (poměr skutečně odebíraného výkonu spotřebičů, které jsou současně v chodu, k jejich jmenovitému výkonu)

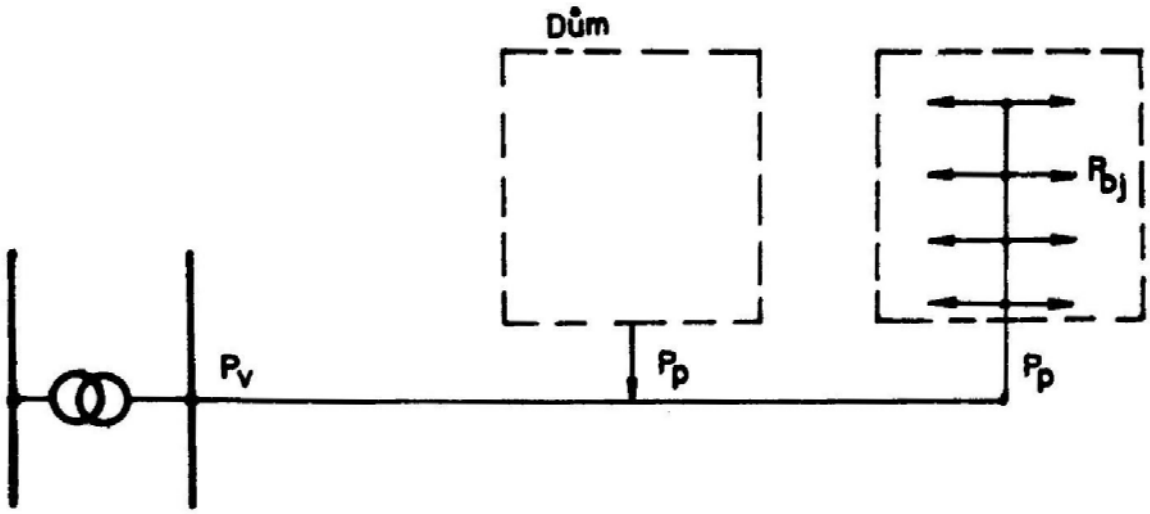
η_m - účinnost spotřebičů (motorů) při daném využití

η_s - účinnost napájecí soustavy od uvažovaného místa ke spotřebiči.

Známe-li pro určitý typ odběratele součinitel β, můžeme z jeho přípojné hodnoty určit požadovaný výkon P_{max}, na který musíme dimenzovat jeho přípojku.

<u>Soudobost f</u> - poměr celkového maxima zatížení více odběratelů za určité časové období k spučtu maxim těchto odběratelů.

$$f = \frac{P_{\max}}{\sum_{i=1}^{n} P_{i(\max)}} \leq 1$$



Obr. 3

Např. je dle obr. 3 maximální zatížení bytové jednotky v domě P_{bj}, pak maximální zatížení přípojky bude:

$$P_p = f_2 \cdot \sum_{i=1}^{n} P_{bj}$$

kde **f_2** - soudobost bytových odběrů

a maximální zatížení vývodů z transformovny:

$$P_v = f_1 \cdot \sum_{j=1}^{m} P_p = f_1 \cdot f_2 \cdot \sum_{i=1}^{(m \cdot n)} P_{bj}$$

kde **f_1** – soudobost domovních přípojek.

Odběratele elektrické energie v městských sítích lze rozdělit do několika základních skupin:

a) odběr bytový
b) odběr nebytový (občanská vybavenost)
c) odběr průmyslový
d) veřejné osvětlení.

Zatížení bytových odběratelů:

Dle [14] se byty rozdělují podle stupně elektrizace do těchto kategorií:

A elektřina pro osvětlení a drobné domácí spotřebiče (příkon žádného spotřebiče nepřesáhne 3,5 kVA)
B1 jako A + příprava pokrmů elektřinou (s příkonem nad 3,5 kVA)
B2 jako B1 + ohřev teplé užitkové vody elektřinou (s příkonem nad 3,5 kVA)
C1 jako B2 + vytápění elektřinou smíšené (přímotopné + akumulační)
C2 jako B2 + vytápění elektřinou akumulační.

[14] Zásady pro navrhování distribučních sítí vn a nn (pravidla pro elektrizační soustavu 2) ČEZ 1983.

Dle [14] lze stanovit pro bytový odběr výkonové podklady pro dimenzování distribučních sítí, a to:

- současné zatížení
- realizační výkonové podklady (tj. pravděpodobné hodnoty v polovině životnosti distribučních sítí – za 20 let od realizace)
- výhledové podklady, (tj. pravděpodobné hodnoty na konci životnosti distribučních sítí, za 40 let od realizace).

Současné zatížení - podíl jedné bytové jednotky na maximální zatížení obytného souboru v závislosti na počtu bytových jednotek n.

Kategorie bytů	S_b (kVA/b.j.)
A	$0{,}4 + \frac{1{,}6}{\sqrt{n}}$
B1	$0{,}8 + \frac{3{,}2}{\sqrt{n}}$
B2	$1{,}6 + \frac{6{,}4}{\sqrt{n}}$
C1	$6 + \frac{4}{\sqrt{n}}$
C2	$12 + \frac{8}{\sqrt{n}}$

Realizační výkonové podklady

Kategorie bytů	S_b (kVA/b.j.)
A	$1{,}2 + \frac{4{,}8}{\sqrt{n}}$
B1	$1{,}6 + \frac{6{,}4}{\sqrt{n}}$
B2	$2 + \frac{8}{\sqrt{n}}$
C1	$6 + \frac{4}{\sqrt{n}}$
C2	$12 + \frac{8}{\sqrt{n}}$

Poznámka: Výše uvedené platí pro počet bytů $n \geq 20$.

Měrné zatížení dílčích zatížení sítě

Kategorie bytu	S_b (kVA/b.j.)			
	Vývod nn	DTS vn/nn	Vývod vn	TR 110 kV/vn
A	1,7	1,5	1,27	1,25
B1	2,4	2,1	1,70	1,60
B2	3,0	2,6	2,20	2,00
C1	7,0	6,5	6,10	6,00
C2	14,5	13,5	12,50	12,00

Měrné zatížení DTS vn/nn slouží k určení počtu distribučních transformačních stanic. Měrné zatížení vývodu vn se uvazuje při návrhu sítě vn.

Ve většině našich sídlišť je využíváno elektrické energie v domácnosti v různé míře a jsou velké rozdíly mezi jednotlivými typy odběratelů. Dělíme na 8 stupňů elektrizace

Měrné zatížení pro obytné soubory se smíšenými stupni elektrizace

Stupeň elektrizace	Podíl elektrické energie v domácnosti				Měrné zatížení (realizační hodnoty)	
	Současnost		Perspektiva (realizační hodnoty)		S_b (kVA/b.j.)	
	Vaření	Ohřev Vytáp. TUV	Vaření	Ohřev Vytáp. TUV	Vývod nn	DTS vn/nn
1	ne	ne ne	do 25%	ne ne	1,7	1,5
2	do 25%	ne ne	50 – 70%	ne ne	2,0	1,7
3	30 – 75%	ne ne	100%	ne ne	2,5	2,1
4	ne	ne ne	do 25%	do 15%	1,7 3,0	1,5 2,7
5	do 25%	do 15%	25 – 50%	do 30% S	3,0	2,7

					A	5,5	5,0
6	25 – 50%	15 –30%	do 75%	do 50%	S A	4,5 8,3	4,0 7,8
7	50 – 70%	30 – 60%	do 75%	do 75%	S A	5,4 11,0	5,0 10,0
8	100%	60 – 100%	100%	100%	S A	7,0 14,5	6,5 13,5

<u>Zatížení odběratelů nebytových</u> – realizační výkonové podklady vybraných odběratelů občanské vybavenosti

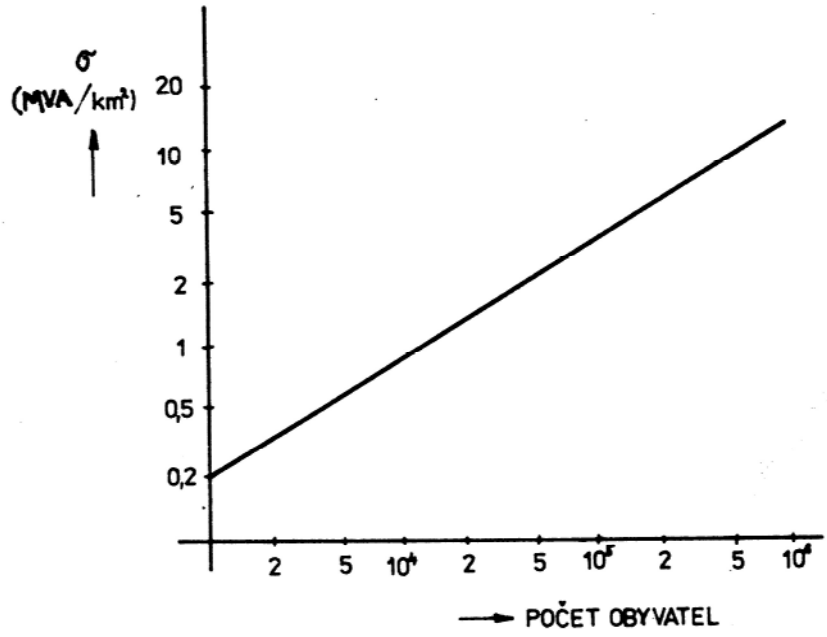
-		Měrné jednotky	S_{max} (kVA)	P_i (kW/měr. jedn.)
Základní školy		třídy (t)	$15 + 1{,}3 \cdot t$ $25 + 3 \cdot t$	3 kW/třídu 8 kW/třídu
Mateřské školky školy a jesle		děti (d)	$0{,}12 \cdot d$ $20 + 0{,}3 \cdot d$	0,25 kW/dítě 1,00 kW/dítě
Polikliniky		ordinace (o)	$20 + 2 \cdot o$	
Restaurace		místa (m)	$25 + 0{,}5 \cdot m$	
Obchody a služby		užitná plocha (u)	$0{,}05 \cdot u$ $0{,}08 \cdot u$	0,1 kW/m^2 1,1 kW/m^2
Nemocnice		lůžka (l)	$200 + 0{,}65 \cdot l$	
Hotel	menší	lůžka (l)	$50 + 0{,}45 \cdot l$	
	větší	lůžka (l)	$1{,}2 \cdot l$	

<u>Koeficienty soudobosti f_i vybraných odběratelů</u>

-	f_i		
	A		B1
Školy	0,5	0,1	0,2
Mateřské školy a jesle	0,6	0,1	0,2
Polikliniky	0,6	0,2	0,1
Restaurace	0,1		1,0
Obchody	0,8	0,2	1,0

Poznámka: Vyšší hodnota v kategorii A se bere v úvahu, předpokládá-li se provoz i ve večerní špičce.

Měrné plošné zatížení:



Obr. 4

Mřížové sítě

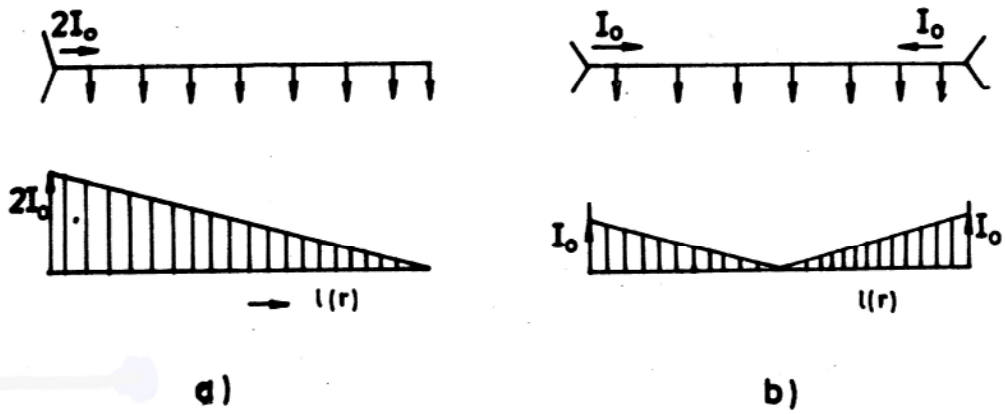
Zvyšující se zatížení paprskových sítí vedlo k výstavbě nových napájecích uzlů a ke vzniku zauzlených sítí. Předpokládáme-li rovnoměrné zatížení paprsků sítě, pak při přechodu na napájení ze dvou stran (obr. 5) lze napěťové a výkonové poměry vyjádřit takto:

a) u paprskové sítě

Úbytek napětí: $$\Delta U = \int_0^R (2.I_0 - r.i)^2\, dr \approx 4.I_0^2.R$$

kde $i = \frac{2.I_0}{R}$, přičemž při konstantním průřezu délka vedení l jé úměrná odporu r

Ztráty: $$\Delta P \approx 3\int_0^R (2.I_0 - r.i)^2\, dr \approx 4.I_0^2.R$$



Obr. 5

b) Vedení napájené ze dvou stran.

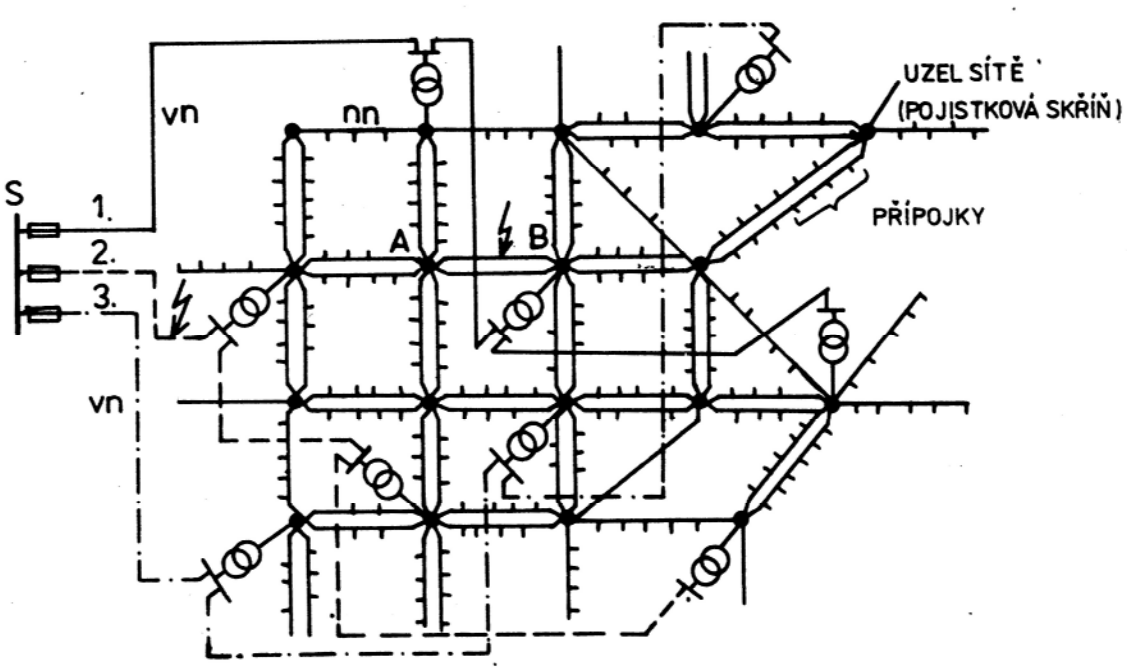
Úbytek napětí: $$\Delta U \approx \int_0^{R/2} (I_0 - r.i)dr \approx \frac{1}{4}.I_0.R$$

Ztráty: $$\Delta P \approx 3.2 \int_0^{R/2} (I_0 - r.i)^2 dr \approx I_0^2.R$$

Z této jednoduché úvahy jsou patrny výhody zauzlené sítě, tj. snížení úbytku napětí i snížení ztrát na čtvrtinu.

Jedním z možných řešení zauzlených sítí je mřížová síť, která je vhodná pro městské aglomerace s pravidelnou zástavbou. Zjednodušené schéma mřížové sítě je uvedeno na obr. 6.

Pro optimalizaci návrhu mřížové sítě je nutno vyřešit :
- návrh sítě vn
- určení transformačního výkonu vn/nn a určení počtu transformátorů
- návrh sítě nn (volba průřezu)



Obr. 6

Určení transformačního výkonu v mřížové síti:

Určení počtu a velikosti transformátorů je technicko-ekonomická otázka. Velký počet transformátorů vede ke zlevnění sítě vn, vlastní transformační stanice jsou dražší. Při malém počtu transformátorů je tomu naopak. Proto se tato otázka obvykle řeší optimalizačními metodami.

Uvažujeme aglomeraci s plochou F (km^2), která má v době maxima zatížení S_m (kVA). Potřebný transformační výkon na jednotku plochy lze stanovit takto:

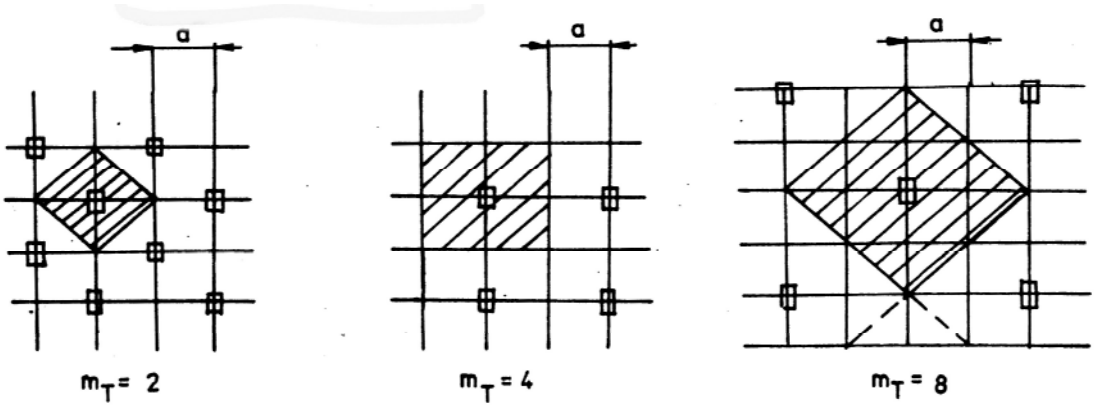
$$P_T = \frac{S_m . \cos\varphi}{F . f_i . f_T} \qquad \left(\frac{kW}{km^2}\right)$$

kde **f_i** – soudobost mezi napáječi vn
f_T – soudobost mezi transformačními stanicemi

Tento součtový výkon platí pro provoz bez poruch transformátorů. Při poruše některého napáječe vn se některé transformátory vyřadí a zbylé musí zatížení převzít. Výkon transfokátorů musí být tedy větší o přídavné zatížení zp při poruše. Přitom ale uvažujeme, že zbylé transformátory lze krátkodobě přetížit, uvažujeme tedy činitel přetížitelnosti pT. Pak bude maximální zatížení všech transformátorů:

$$P_{Tm} = \frac{z_p . S_m . \cos\varphi}{P_T . F . f_i . f_T} = \frac{z_p . \sigma_m}{P_T . f_i . f_T} \qquad \left(\frac{kW}{km^2}\right)$$

Když měrná hustota zatížení: $$\sigma_m = \frac{S_m . \cos\varphi}{F} \qquad \left(\frac{kW}{km^2}\right)$$



Obr. 7

<u>Činitel přídavného zatížení zp závisí :</u>

a) na hustotě rozložení transformačních stanic v síti , tj. na počtu ok m_T, které napájí jeden transformátor (obr. 7). Zjednodušeně se předpokládá, že ulice tvoří pravidelné čtvercové obrazce se vzdáleností ulic a (m), kabely se kladou po obou stranách ulice (obr. 6).
b) na počtu primárních napáječů n. Je zřejmé, že při n = 2 při poruše jednoho napáječe je přídavné zatížení $z_p = 2$. Při vyšším počtu napáječů přídavné zatížení postupně klesá a od hodnoty n = 5 zůstává přibližně stejné.

Optimalizačními výpočty byl stanoven optimální provoz mřížové sítě pro počet napáječů vn n = 4 při počtu napájecích ok $m_T = 1 \div 4$. Pro tyto případy je činitel přídavného zatížení $z_P = 1{,}35$.

Uvažujeme-li činitel přetížení transformátorů při poruše $p_T = 1{,}2$ můžeme stanovit využití transformátoru v době špičky

$$P_T = P_{Tm} \frac{P_T}{z_p} = \frac{1{,}25}{1{,}35} P_{Tm} = 0{,}92.P_{Tm}$$

U mřížové sítě je tedy skoro 100 % využití transformátorů.

<u>Určení průřezu kabelů mřížové sítě nn:</u>

Základní předpoklady optimalizačního výpočtu sítě nn
- mřížová síť je pravidelná a čtvercová
- měrná hustota zatížení je konstantní na celé uvažované ploše
- použité transformátory mají stejné výkony a jsou umístěny v uzlech sítě
- pro celou síť nn bude použit jeden průřez kabelů

a) <u>Návrh průřezu dle úbytku napětí</u>

Dle zkušeností u nás i v cizině jsou na městské sítě přísnější požadavky a proto se obvykle uvažuje maximální úbytek napětí 2 – 5 %.

Maximální zatížení sítě nn:

$$P_{m2} = \frac{\sigma_m}{f_i . f_T . f_2} \qquad \left(\frac{kW}{km^2}\right)$$

kde **f_2** – soudobost vývodů nn

Dále lze stanovit zatížení na 1m délky vodiče:

$$z = \frac{P_{m2}}{L_k} = \frac{\sigma_m . a}{4.f} 10^{-3} \qquad \left(\frac{W}{m}\right)$$

kde **a** – napětí ulic
L_k – celková délka kabelů

Zatížení vodiče délky l:

$$I = \frac{z.l}{\sqrt{3}.U.\cos\varphi} \qquad (A)$$

Sdružený úbytek napětí po zjednodušení a úpravách:

$$\Delta U = \frac{1}{2}\frac{z}{U.\rho.S}.l^2.(1 + tg\alpha.tg\varphi) \qquad (V)$$

kde **ρ** – měrný odpor vodiče
S – průřez vodiče
α – úhel vedení ($tg\alpha = \frac{X}{R}$)

Odtud stanovíme průřez vodiče:

$$S = \frac{1}{2}\frac{z.l^2}{\Delta u.U.\rho}.(1 + tg\alpha.tg\varphi) \qquad (mm^2)$$

nebo pro měrnou hustotu zatížení σ a pro procentní úbytek napětí

$$\Delta u = \frac{\Delta U}{U}.100 \qquad (\%)$$

$$S = \frac{1}{2}\frac{\sigma.a.l^2}{4.f.\Delta u.U^2.\gamma}.(1 + tg\alpha.tg\varphi).100 \qquad (mm^2)$$

b) Návrh průřezu dle dovoleného proudového zatížení

Při stanovení proudové zatížitelnosti je nutno respektovat některé činitele zvyšující či snižující jmenovitou hodnotu. Je to např. vliv teploty (uložení v zemi), vliv sousedních kabelů, proměnlivé zatížení, atp.

Maximální proud, respektující poruchové stavy, lze dle předchozí rovnice určit takto:

$$I_m = \frac{\sigma . a . l_m . z_p}{4 . f . \sqrt{3} . U . \cos\varphi} \qquad (A)$$

kde **l_m** – maximální délka vedení
z_p – činitel přídavného zatížení

Pro tento proud lze určit průřez vodiče, nejlépe s využitím aproximační rovnice:

$$S = q . I_m^{\frac{3}{2}} \qquad (mm^2)$$

kde konstanta q – je pro kabely nn

	CNKPO	AYKY	ANKAY	AKOP
q	1/49	1/29	1/41	1/45

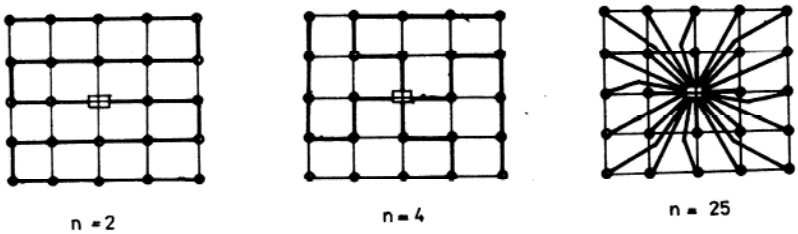
Návrh primární sítě vn:

Délka kabelů sítě vn závisí na počtu připojených transformačních stanic. Např. pro plochu 1 km^2 s mřížovou sítí s a = 200 m je počet transformačních stanic 25. Tyto stanice lze z napájecí stanice připojit pomocí 2 až 25 vývodů (jeden vývod vylučujeme kvůli spolehlivosti dodavky), jak je naznačeno na obr. 8.

Při rozboru byla hledána závislost délky vodičů vn na počtu ok m_T nebo na počtu napáječů n_T. Pro pravděpodobný počet 20 transformačních stanic na 1 km^2 lze stanovit délku napáječů L.

$$L = 1{,}2 . n_T . t \qquad (m)$$

kde **t** – je vzdálenost transformačních stanic



Obr. 8

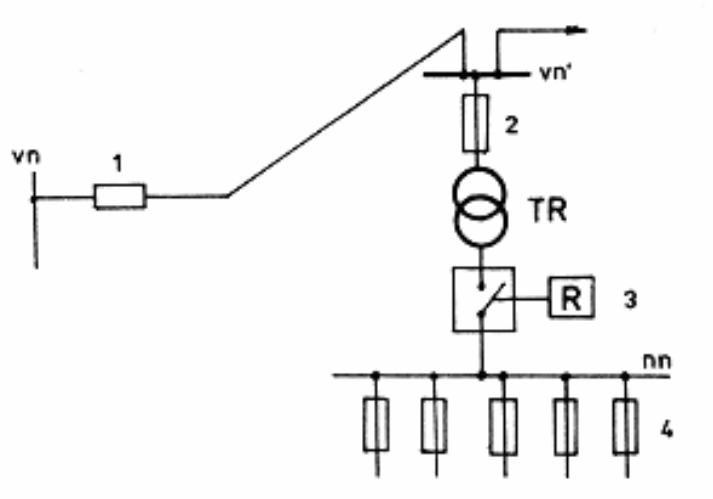
Uvážíme-li, že napájecí uzly nebývají ideálně uprostřed, dále prodloužení délky pro terénní překážky, ztráty kabelů pro jejich zahušťování, lze odhadnout prodloužení asi o 35 %,takže celková délka kabelů vn bude:

$$L = 1{,}35.1{,}2.n_T.t = 1{,}6.n_T.t \qquad (m)$$

Vzdálenost transformačních stanic t závisí na vzdálenosti ulic a na počtu ok. Jejich závislost lze vyjádřit :

$$t = a.\sqrt{1{,}8.m_T} \qquad (m)$$

Jištění v mřížovaných sítích:

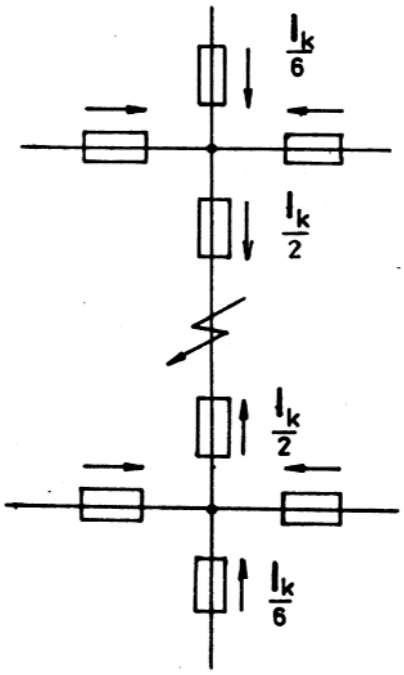


Obr. 9

Na obr. 9 je podrobněji rozkresleno zapojení napájecího uzlu mřížové sítě dle obr. 6. V síti vn mají vývody z napájecí rozvodny vypínače s nadproudovou ochranou (1) a u transformátoru pojistky (2). Na sekundární straně transformátoru je vypínač nn se směrovým relé zpětného toku (3). V síti nn jsou použity výkonové pojistky (4) s pomalou charakteristikou.

Výkonové pojistky mají ve všech uzlech stejný jmenovitý proud, který se volí podle maximálního proudu v kabelu.

Při poruše na napájecím vedení vn vypne hlavní vypínač (1) a téměř současně i vypínač nn (3) u všech transformátorů napájených z tohoto vedení, neboť do zkratu jde proud též přes síť nn od jiných napáječů vn, na což reagují relé zpětného toku (R) a vývod vypne.



OBR. 2-13

Obr. 10

Při poruše na transformátoru odpojí pojistka (2) síť vn a současně relé zpětného toku odpojí síť nn, je vyřazen pouze jeden transformátor. Na obr. 10 je vidět příklad rozdělení zkratových proudů.

Výhody a nevýhody mřížové sítě

Optimální návrh je značné ovlivněn odhadem budoucího zatížení. Důležitým je návrh průřezu kabelů, které vydrží v zemi až 40 let a je neekonomické je dříve vyměňovat. Proto se dynamika sítí řeší přidáním nových transformačních stanic, čímž se zkrátí kabely mezi stanicemi a tím i jejich zatížení a úbytky napětí na nich.

Ve srovnání s jednoduššími sítěmi má mřížová síť tyto **výhody**:

- větší stabilita napětí, menší úbytky napětí
- lze připojovat motory nakrátko i velké výkony až do poloviny výkonu transformátoru
- lepší využití transformátorů a vedení
- ušetří se asi 30 % výkonu transformátorů
- ztráty jsou asi o 30 % menší
- velká spolehlivost dodávky elektrické energie
- poruchy napáječů vn se nepřenášejí do sítě nn
- poruchy síti nn se obvykle omezí na úseky 150 – 200 m

Hlavní nevýhody **mřížové** sítě:

- větší zkratové proudy v síti nn
- síť je při provozu méně přehledná, než paprsková síť
- při rozpojení mřížové sítě nn pojistkami se objevuje na kontaktech zpětné napětí