

6. Dimenzování

Dimenzování rozvodného zařízení:

- návrh průřezu **proudovodných částí** a jeho následná kontrola
- návrh a potřebná kontrola všech dalších důležitých částí (izolátorů, vypínačů, odpojovačů, měřících transformátorů a dalších pomocných zařízení)

Nároky na elektrické vedení

- velmi obsáhlé (mnoho kritérií)
- často protichůdné

Požadujeme:

- nízké pořizovací i provozní náklady
 - velkou přenosovou schopnost
 - odolnost proti vlivům okolí
 - bezpečnost vůči osobám i věcem
 - prostorovou nenáročnost
 - hospodárnost provozu atd.
- mnohé z těchto vlastností můžeme ovlivnit volbou vhodného druhu a správným dimenzováním vedení



Průřez vodičů silnoproudého elektrického rozvodu musí být takový, aby:

- a) se vedení nadměrně neoteplovalo, tj: provozní teplota vodičů nebyla vyšší než je dovoleno ↔ zatížení vodiče může být pouze tak velké, aby **nebyla překročena dovolená provozní teplota** vodiče
- b) vedení bylo hospodárné → **hustota proudu** ve vodiči byla **v hospodárných mezích**
- c) vedení (vodiče) bylo **dostatečně mechanicky pevné** → vodiče se nesmějí přetrhnout
- d) nedocházelo k příliš vysokým **úbytkům napětí** (ΔU **ve stanovených mezích**), aby spotřebiče pracovaly správně
- e) vedení **odolávalo** dynamickým a tepelným **účinkům zkratových proudů** příp.
- f) byla zajištěna správná funkce ochrany před nebezpečným dotykem napětím

Má-li průřez vedení vyhovět všem těmto podmínkám, rozhodne o něm ta, podle které vychází průřez největší. Nejčastěji to bývá přípustné oteplení.

Při praktickém výpočtu → určíme průřez vodiče podle podmínky a) a kontrolujeme podle ostatních

V některých případech nemusí být splněny všechny uvedené podmínky → uvedeno v normách pro dimenzování (např. ČSN 34 16 10) „Elektrický silnoproudý rozvod v průmyslových provozovnách“

6.1 Dimenzování vedení podle oteplení (dovolené provozní teploty, dovoleného proudového zatížení)

Elektrické vedení je tvořeno:

- vodičem (vede elektrický proud)
- izolací (udržuje rozdíl napětí mezi vodičem a okolím)

Používané vodiče nejsou dokonalé → průchodem elektrického proudu dochází ke ztrátám → vyvíjí se teplo, vodiče se zahřívají

Musí platit: $J \leq J_m$,

kde: ϑ_m ... **maximální hodnota teploty** vodiče, která nesmí být překročena,
... závisí na materiálu izolace a na okolním prostředí (jejich odolnosti vůči tepelnému působení)

$\Rightarrow \Delta\vartheta_m = \vartheta_m - \vartheta_o$... nesmí překročit určitou mez

Hodnota max. proudu, kterou může být vodič zatěžován: $I_z = \sqrt{\frac{\Delta J_m}{R \cdot T}}$

kde: $\Delta\vartheta_m$... max. dovolené oteplení vodiče
 ϑ_m ... nejvyšší dovolená provozní teplota vodiče
 ϑ_o ... základní teplota okolního prostředí
R ... elektrický odpor
T ... tepelný odpor mezi vodičem a okolím

Toto byl **zjednodušený postup výpočtu** dovoleného zatížení, kdy neuvažujeme, např.:

- různé druhy elektrických ztrát (vířivými proudy, vlivem skin efektu, vlivem vzájemné indukčnosti jednotlivých jader, dielektrické ztráty, ztráty v kovovém stínění, plášti apod.)

Postup návrhu průřezu vodiče

Dovolená provozní teplota závisí na:

- konstrukci a materiálu vodiče
- izolaci vodiče
- teplotě prostředí, v němž je vodič uložen
- je možno ji najít v tabulkách
- určujeme ji podle skutečného proudového zatížení

Případně je možno vycházet přímo z dovoleného proudového zatížení \rightarrow v příslušných zatěžovacích tabulkách najdeme pro zvolený typ vodiče příslušný průřez

- pro jednotlivé druhy vodičů při jejich provozní teplotě určíme ze vztahu:

$$I_z = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot \dots \cdot k_i \cdot I_N$$

kde: I_z ... dovolený proud příslušného vodiče
 k_1, \dots, k_i ... přepočítávací součinitele proudové zatížitelnosti pro příslušný vodič
 I_N ... jmenovitý proud vodiče

Přepočítávací součinitele proudové zatížitelnosti k_1, \dots, k_i vyjadřují různé podmínky a prostředí uložení, různé typy i průřezy vodičů apod., jsou uvedeny v normě ČSN 33 20 00-5-523 (IEC 364-5-523) s názvem „Elektrická zařízení – dovolené proudy“ (spolu s jmenovitými a dovolenými proudy)

Např.:

- k_1 ... rozlišuje druh prostředí (vzduch, země, voda) (viz tab.6-1)
- k_2 ... teplotu prostředí pro izolované vodiče a kabely (při základní teplotě 25°)
- k_3 ... teplotu prostředí pro holé vodiče
- k_4 ... seskupení kabelů v zemi vedle sebe
- k_5 ... uložení vodičů v instalačních trubkách (viz tab.6-2)
- k_6 ... svislé uložení kabelu na vzduchu
- k_7 ... při polotěsném seskupení kabelů ve vzduchu
- k_8 ... při těsném seskupení kabelů ve vzduchu

Tab. 6-3, 6-4: ČSN 34 10 20 „Předpisy pro dimenzování a jištění vodičů a kabelů“

Tab. 6-1: Přepočítací součinitele proudové zatížitelnosti pro půdu s různým měrným tepelným odporem (za základ se bere proudová zatížitelnost při měrném tepelném odporu půdy 0,7 K. m/W)

Měrný tepelný odpor půdy K . m/W (viz tab.)	0,4	0,6	0,7	0,8	1	1,5	2	2,5
Přepočítací součinitel proudové zatížitelnosti	1,1	1,05	1,0	0,95	0,89	0,78	0,67	0,62

Tab. 6-2 Způsoby uložení vodičů a kabelů

Referenční způsob uložení		Jiné způsoby uložení dovolující stejné dovolené proudy
1	2	3
 <p>Izolované vodiče v trubkách zapuštěných v izolačních stěnách</p>	A	<ul style="list-style-type: none"> - vícežilové kabely uložené přímo v izolační stěně - izolované vodiče v trubkách v uzavřených drážkách - vícežilový kabel v trubkách v izolačních stěnách
 <p>Izolované vodiče v trubkách na stěně</p>	B	<ul style="list-style-type: none"> - izolované vodiče v kanálech (lištách) na stěně - izolované vodiče v trubkách ve větraných drážkách - izolované vodiče, kabely jedno- nebo vícežilové v trubkách nebo dutinách (kanálech) ve zdivu
 <p>Kabely vícežilové na zdi</p>	C	<ul style="list-style-type: none"> - kabely jednožilové na zdi - kabely vícežilové úplně ve zdivu - kabely vícežilové na podlaze - kabely jedno nebo vícežilové v otevřených nebo větraných drážkách - vícežilové kabely v kanálech nebo trubkách ve vzduchu nebo ve styku se zdivem; hodnoty násobené 0,8 (poznámka 1)
 <p>Kabely vícežilové v trubkách v zemi</p>	D	<ul style="list-style-type: none"> - kabely jednožilové v trubkách v zemi - kabely jedno- nebo vícežilové uložené přímo v zemi (poznámka 2)

Tab. 6-3: Dovolovaný proud kabelů a vodičů (A) při uložení podle tabulky 6

Způsob uložení		Počet zatížených vodičů a druh izolace								
		Tř PVC	Dva PVC		Tř PRC	Dva PRC				
A										
B				Tř PVC	Dva PVC	Tř PVC		Dva PRC		
C					Tř PVC	Dva PVC	Tř PRC		Dva PRC	
E, F						Tř PVC	Dva PVC	Tř PRC	Jeden PVC	Dva PRC
Průřez mm ²		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Měď	1	10,5	11	12	13,5	14,5	17	18	19	21
	1,5	13	14,5	15,5	17	18,5	22	23	24	26
	2,5	18	19,5	21	23	25	30	32	33	36
	4	24	26	28	31	34	40	42	45	49
	6	31	34	36	40	43	52	54	58	63
	10	42	46	50	54	60	71	75	80	88
	16	56	61	68	73	80	96	100	107	115
	25	73	80	89	95	101	119	127	138	149
	35				117	126	147	157	171	185
	50				141	153	179	192	210	225
	70				179	196	229	246	269	289
	95				216	238	278	298	328	352
	120				249	276	322	346	382	410
	150				285	318	371	399	441	473
	185				324	362	424	456	506	542
	240				380	424	500	538	599	641
Hliník	1	8	8,5	9,5	11	11	13	13,5	15	16
	1,5	10	11	12	14	14	16,5	17,5	19	21
	2,5			16,5	19	19,5	23	24	25	28
	4	19	20	22	25	26	31	32	34	38
	6	24	26	28	32	33	39	42	44	49
	10	32	36	39	43	45	54	58	61	67
	16	43	48	53	58	61	73	77	82	91
	25	57	63	69	76	78	89	97	101	108
	35				94	96	111	120	126	135
	50				113	117	135	147	154	165
	70				142	150	173	187	198	211
	95				171	182	210	227	241	257
	120				197	212	244	263	280	300
	150				226	245	282	302	324	346
	185				256	280	322	346	371	397
	240				300	330	380	409	439	470

Tab. 6-4: Dovolovaný proud kabelů a vodičů (A) při uložení v zemi

Způsob uložení	Průřez vodičů mm ²	Počet zatížených vodičů a druh izolace						
		Dva PVC		Tři PVC		Dva PRC	Tři PRC	
		2,5 K . m/W	0,7 K . m/W	2,5 K . m/W	0,7 K . m/W	2,5 K . m/W	2,5 K . m/W	
D	Měď							
	1,5	22	34	18	28	26	22	
	2,5	29	45	24	38	34	29	
	4	38	59	31	48	44	37	
	6	47	73	39	61	56	46	
	10	63	98	52	81	73	61	
	16	81	125	67	105	95	79	
	25	104	161	86	134	121	101	
	35	125	195	103	161	146	122	
	50	148	231	122	191	173	144	
	70	183	286	151	236	213	178	
	95	216	338	179	280	252	211	
	120	246	384	203	317	287	240	
	150	278	438	230	359	324	271	
	185	312	488	257	401	363	304	
	240	360	563	297	464	419	351	
	300	407	636	336	525	474	396	
	D	Hliník						
		1,5	17	27	14	22	20	16,5
		2,5	22	34	19	30	26	22
4		29	45	24	38	34	29	
6		36	56	30	47	42	36	
10		48	75	40	63	56	47	
16		62	97	52	81	73	61	
25		80	125	66	103	93	78	
35		96	150	80	125	112	94	
50		113	177	94	147	132	112	
70		140	219	117	183	163	138	
95		166	259	138	216	193	164	
120		189	295	157	245	220	186	
150		213	333	178	278	249	210	
185		240	375	200	313	279	236	
240		277	432	230	359	321	272	
300		313	489	260	406	364	308	

6.2 Dimenzování vodičů podle hospodárnosti (podle hospodárné hustoty proudu)

Na výpočtu průřezu vodičů závisí výše pořizovacích a provozních nákladů:

- při nedostatečném průřezu přibývá poruch a ztrát energie → zkracuje se životnost vedení
- předimenzování průřezu je nevhodné ← zvětšují se náklady

Pro dosažení optimální hodnoty průřezu se provádí kontrola dimenzování vedení podle hospodárné hustoty proudu: $\sigma = \frac{I_p}{S}$ či $S = k \cdot I_p \cdot \sqrt{\tau_z}$,

kde: S [mm²] ... hospodárný průřez vodiče
 σ [A/mm²] ... hospodárná hustota proudu
 I_p [A] ... výpočtový proud
 k ... součinitel závislý na materiálu jádra vodiče a na izolaci:
 (viz tab. 6-5, ČSN 34 16 10)
 - pro Cu: 0,0053÷0,007
 - pro Al: 0,009÷0,0168 } podle druhu vodiče

Tab. 6-5: Součinitel k pro výpočet hospodárného průřezu trojfázového rozvodu

Druh vedení	Materiál jádra vodiče	
	Cu	Al
Holé přípojnice	0,006	0,014
Kabely od 25 mm ² výše do 10 kV	0,007	0,0168
Chráněné vodiče a kabely do 1 kV o průřezu 16 mm ²	0,006	0,0129
Chráněné vodiče, kabely do 10 mm ² , 1 kV nebo vodiče v instalačních trubkách	0,0053	0,009

τ_z ... doba plných ztrát

Pozn.: Doba plných ztrát = doba, za níž maximální odebíraný proud I_{max} způsobí stejné ztráty výkonu jako časově proměnný proud $I(t)$ ve sledovaném období t_0 (8760 h/rok)

$$R \cdot I_{max}^2 \cdot \tau_z = \int_0^{t_0} R \cdot I^2(t) \cdot dt \Rightarrow \tau_z = \frac{\int_0^{t_0} I^2(t) \cdot dt}{I_{max}^2}$$

Hospodárný průřez **se kontroluje** u hlavních trojfázových vedení elektrického rozvodu v průmyslových závodech a to jen když:

- $\tau_z > 1000$ hod/rok
- předpokládáme, že zařízení bude v provozu alespoň 10 let

Nekontroluje se:

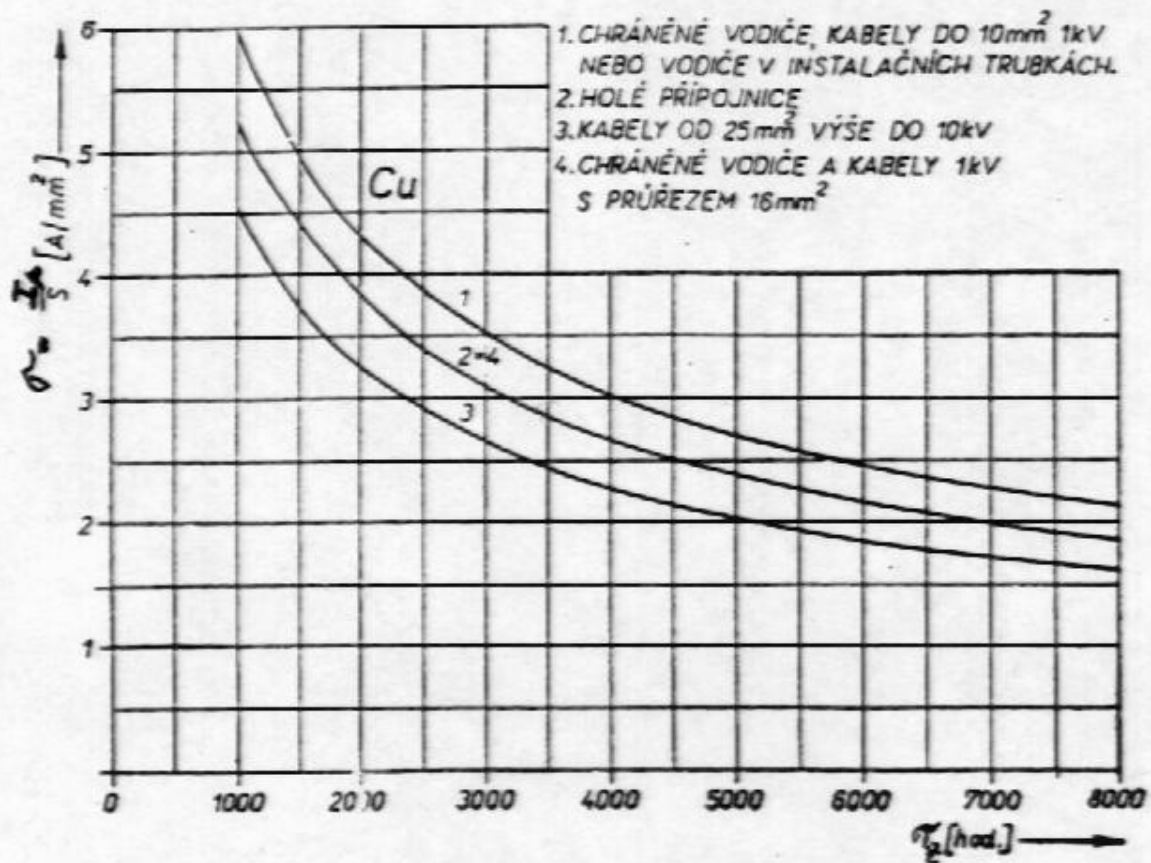
- u světelných sítí, které jsou kontrolovány na ΔU
- u vedení k menším spotřebičům

Vypočtený hospodárný průřez zaokrouhlíme na nejbližší (i nižší) normalizovaný.

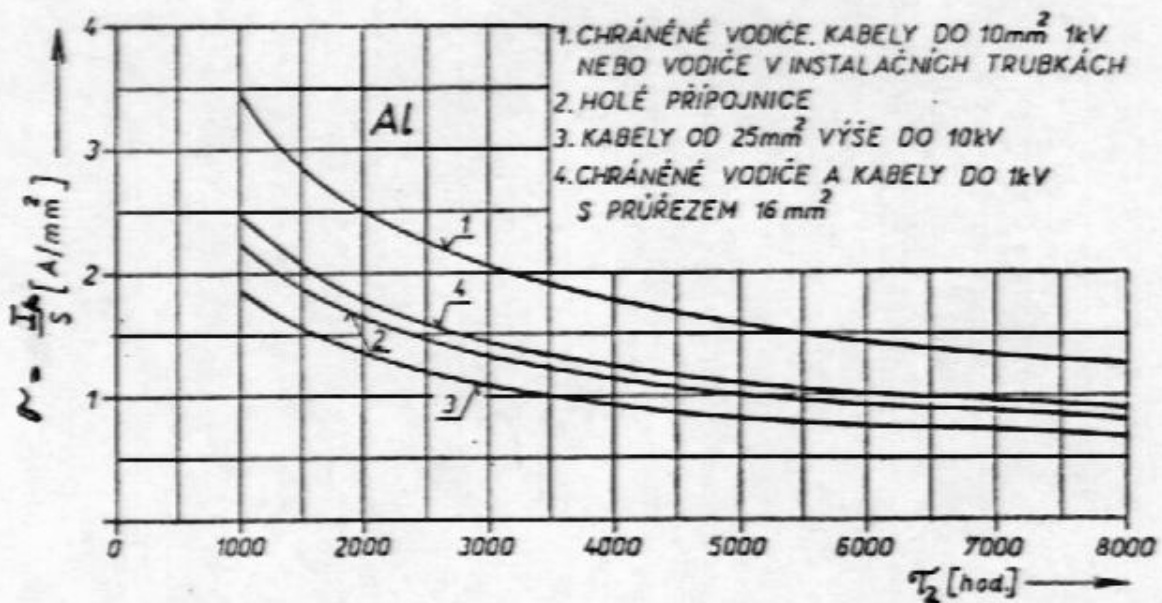
Výsledek rozhoduje o dimenzování, je-li větší než průřez vypočtený podle ostatních podmínek.

Hospodárným průřezem se zabývá norma ČSN 34 16 10 „Elektrický silnoproudý rozvod v průmyslových provozovnách“

Pozn.: Při dimenzování je možno využít grafu závislosti hospodárné hustoty proudu na 1mm² S na době plných ztrát za rok τ_z (Obr. 6-1, 6-2)



Obr. 6-1. Specifická hospodárná hustota proudu pro měděné vodiče



Obr. 6-2. Specifická hospodárná hustota proudu pro hliníkové vodiče

Tab. 6-6 Nejmenší průřezy vodiče z hlediska mechanické pevnosti

Jmenovité napětí zařízení	Druh vedení silnoproudého rozvodu	Nejmenší průřez vodiče	
		měděného mm ²	hliníkového mm ²
do 1 000 V*)	Pohyblivé přívody provedené: velmi lehkými šňůrami lehkými šňůrami středními šňůrami těžkými šňůrami	0,35 0,75 1 1,5	— — — —
	Izolované vodiče s ochranným obložním (v trubkách apod.) a můstkové vodiče	1	2,5
	Kabely a chráněné vodiče	1,5	2,5
	Izolované jednožilové vodiče na podpě- rách uvnitř budov při rozpětí do 0,8 m	1,5	2,5
	přes 0,8 m do 3 m	2,5	4
	přes 3 m do 5 m	4	6
	přes 5 m do 8 m	6	10
	u vnějšího rozvodu při rozpětí: do 20 m	6	16
	přes 20 m	podle ČSN 34 1100	
	Holé vodiče: uvnitř budov při rozpětí do 2 m	4	6
	nad 2 m do 10 m	4	10
	u vnějšího rozvodu při rozpětí do 20 m	6	16
	nad 20 m	podle ČSN 34 1100	
	nad 1 000 V	Pro všechny druhy vedení viz bližší ustanovení ČSN 34 1610 a tam citovaných příslušných ČSN.	

*) Bližší viz též ČSN 34 1610.

6.3 Dimenzování vedení podle mechanické pevnosti

Vzhledem k mechanické pevnosti vedení je třeba provádět kontrolu, aby **průřez vodiče nebyl menší než je nejmenší dovolený** průřez vodiče. Ten je jednoznačně určený pro jednotlivé druhy vedení a způsob uložení vodičů → ČSN (např. 34 16 10) – viz tab. 6-6

↑

Některé druhy vedení jsou při montáži i za provozu vystaveny mechanickému namáhání. Jsou to hlavně venkovní vedení, ale i pohyblivé přívody, vedení na pracovních strojích

v pojízdných prostředcích apod. → pro ně platí příslušné předpisy, které stanoví zmíněné minimální průřezy.

Je možné sem zahrnout i odolnost proti dynamickému namáhání, které vznikne při zkratu – MY až ad e)!

6.4 Dimenzování vedení podle dovolených úbytků napětí

Vodiče jednotlivých částí rozvodu musí být dimenzovány tak, aby při předpokládaném zatížení **nevznikl** na svorkách spotřebičů **nedovolený pokles napětí** → má nepříznivý vliv na funkci spotřebičů

!Kontrola úbytků napětí se provádí hlavně u vodičů nn !

Konkrétní požadavky týkající se velikosti úbytků napětí jsou obsaženy v různých technických normách – výběr z nich viz tab. 6-7



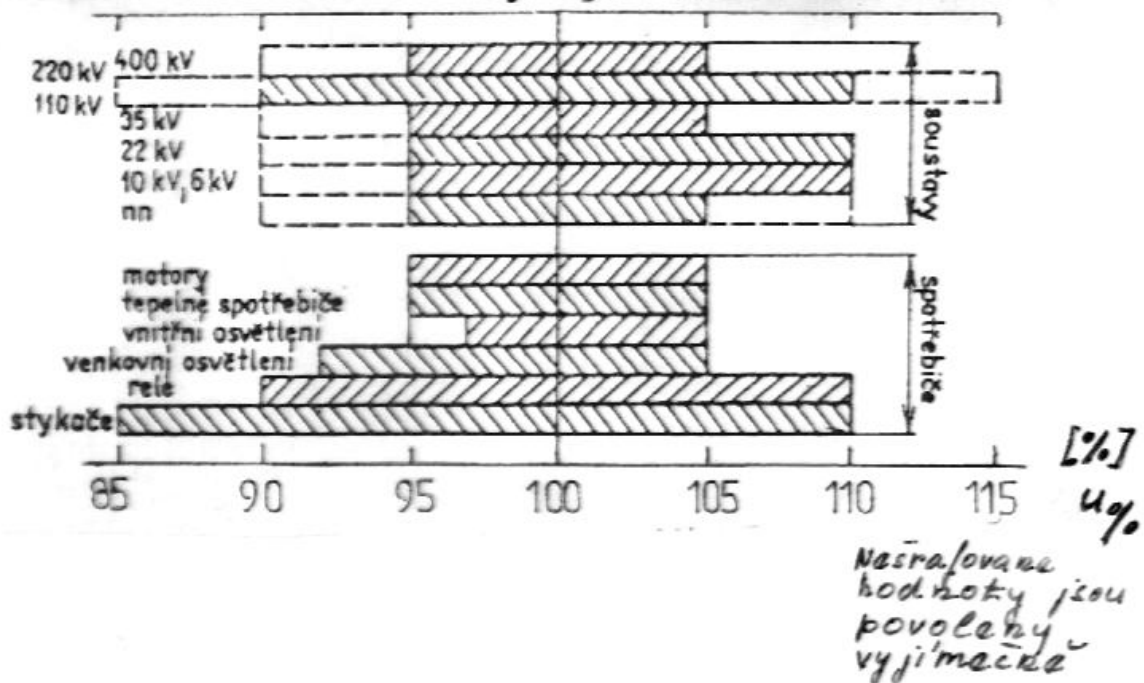
Nejdůležitější v ČSN 34 16 10 → Obr. 6-3



Pro většinu spotřebičů (motorických i odporových)

- dlouhodobé kolísání napětí $\pm 5\%$
- krátkodobě až 10%

Obr. č. 6-3: Dovolene' odchylky napětí v ES



Pro světelné zdroje nemá napětí klesnout pod 97% U_n rozvodné soustavy.

Rozdělení úbytku napětí na jednotlivé části rozvodu norma nepředepisuje. Nejvyšší přípustné napětí rozvodné soustavy v kterémkoli místě nemá být

- dlouhodobě $> 105\% U_n$
 - krátkodobě $> 110\% U_n$
- } rozvodné soustavy

Tab. 6-7: Dovolené úbytky napětí

Druh zařízení, obvodu	Dovolný úbytek vyjádřený v % jmenovitého napětí
Ve vnitřních rozvodech objektů občanské a zemědělské výstavby (ČSN 33 2130: 1985)	
mezi přípojkovou skříní a rozváděčem za elektroměrem – u světelného a smíšeného odběru – u jiného než světelného odběru	2 % 3 %
mezi rozváděčem za elektroměrem a spotřebičem – u světelných obvodů – u tepelných obvodů – u ostatních obvodů	2 %, nejvýše však 4 % 3 %, nejvýše však 6 % 5 %, nejvýše však 8 %
V průmyslových rozvodech (podrobnosti viz v ČSN 34 1610: 1963)	
motory (kromě jeřábových) při výpočtovém (nikoli záběrném) proudu	5 %
světelné zdroje při výpočtovém zatížení	3 %
venkovní osvětlení a osvětlení kabelových kanálů	8 %
tepelné (odporové) spotřebiče	5 %
Elektrická zařízení v podzemí (ČSN 34 1410: 1986)	
spotřebiče všech druhů	10 %
motory při těžkém rozběhu	20 %
Všeobecně stroje a pohony s elektromotory (ČSN 33 2190: 1987)	
elektromotory nakrátko při spouštění	7 %
elektromotory při ustáleném chodu	7 %
Jeřáby a zdvihadla (ČSN 33 2550:1992)	
Jeřáb musí spolehlivě pracovat při úbytku	2 %
Vlastní spotřeba elektráren a tepláren (ČSN 38 1120: 1964)	
topidla	5 %
relé	10 %
elektromagnetické stykače	15 %
elektromotory při spouštění stálém chodu	15 %, nejvýše však 20 % 5 %

Pozn.: Při krátkodobém provozu obvykle uvažujeme nejmenší možné zatížení soustavy a chod uvažovaných zařízení naprázdno.

6.4.1 Úbytek napětí $\Delta U = |\overline{U}_1| - |\overline{U}_2|$

Při výpočtech ΔU v rozvodných sítích nn a vn můžeme příčnou admitanci \overline{Y} zanedbat, tj. uvažujeme pouze R a L.

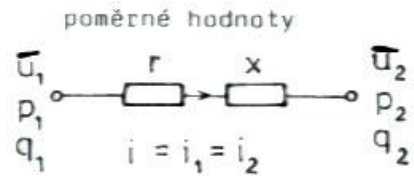
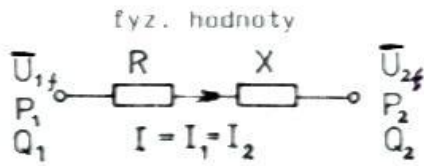
U ss sítí, domovního rozvodu apod. – zanedbáváme i L.

Obecný výpočet ΔU a fázorové diagramy

Náhradní schéma a fázorový diagram → obr. č. 6-4

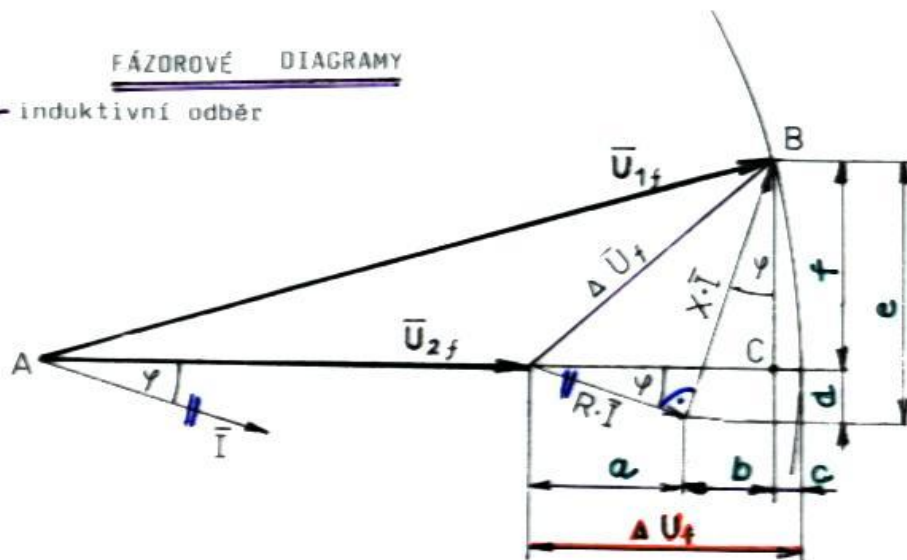
Obr. č. 6-4

NÁHRADNÍ SCHÉMA

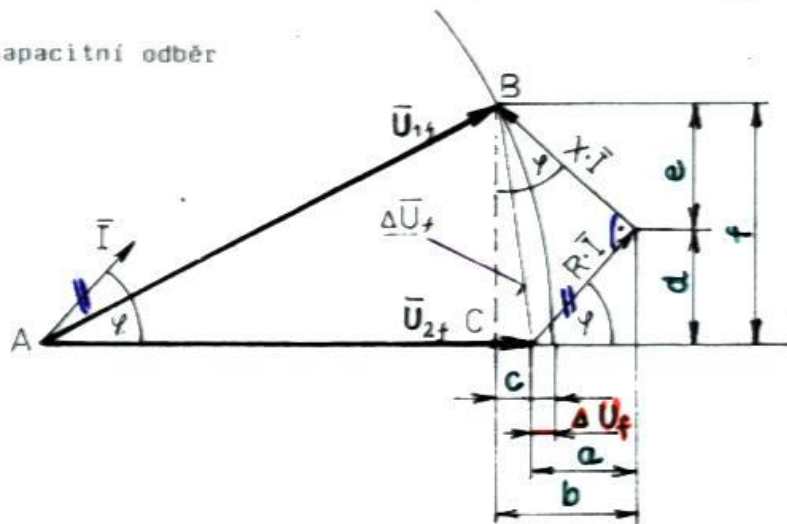


FÁZOROVÉ DIAGRAMY

- induktivní odběr



- kapacitní odběr



- pro **induktivní odběr** (převažuje v distribuční soustavě), ve fázorových hodnotách:

$$\Delta U_f = |\bar{U}_{1f}| - |\bar{U}_{2f}| = R \cdot I \cdot \cos j + X \cdot I \cdot \sin j + \frac{(X \cdot I \cdot \cos j - R \cdot I \cdot \sin j)^2}{2 \cdot U_f}$$

- pro **kapacitní odběr**

$$\Delta U = R \cdot I \cdot \cos j - X \cdot I \cdot \sin j + \frac{(X \cdot I \cdot \cos j + R \cdot I \cdot \sin j)^2}{2 \cdot U_f}$$

Sdružená hodnota úbytku

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot \Delta U_f \text{ (blíže vysvětleno později)}$$

Pozn.: Vztah pro c je odvozen z ΔABC (u m platí – pro induktivní, + pro kapacitní charakter)

$$(X \cdot I \cdot \cos j - R \cdot I \cdot \sin j)^2 + (U_{1f} - c)^2 = U_{1f}^2$$

$$(X \cdot I \cdot \cos j - R \cdot I \cdot \sin j)^2 = 2 \cdot U_{1f} \cdot c - c^2 = c \cdot (2 \cdot U_{1f} - c)$$

$c \ll U_{1f} \rightarrow$ můžeme zanedbat \rightarrow

$$c = \frac{(X \cdot I \cdot \cos j - R \cdot I \cdot \sin j)^2}{2 \cdot U_{1f}}$$

6.4.2 Konkrétní výpočet DU pro otevřené vedení (= napájené z jedné strany) s 1 odběrem na konci

1) Vedení ss

- úbytek napětí je dán **Ohmovým zákonem**

$$\Delta U = R \cdot I = r \cdot \frac{2 \cdot l}{S} \cdot I \quad [\text{V}]$$

kde: l [m] ... vzdálenost od napájecího bodu (2l-respekt. zpětné vedení)

ρ [$\mu\Omega\text{m}$] \leftrightarrow [$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$] ... měrný odpor vodiče

S [mm^2] ... průřez vodiče

- **procentní úbytek napětí** (vztažené k napěťové hladině vedení = napětí na začátku)

$$\Delta u \% = \frac{\Delta U}{U} \cdot 100 = \frac{200 \cdot r \cdot l \cdot I}{S \cdot U}$$

- je-li odběr zadán **výkonem** spotřebiče

$$P = U \cdot I \Rightarrow \Delta u \% = \frac{200 \cdot r \cdot l \cdot P}{S \cdot U^2}$$

- při výpočtech je výhodné použít tabulku 6-8, která udává tzv. **ekvivalentní odpor** R_K jednoho km vodiče odpovídající různým průřezům vedení

$$\Delta u \% = \frac{200 \cdot R_K \cdot l \cdot P}{U^2}, \quad \text{kde } R_K [\Omega/\text{km}] \Rightarrow l [\text{km}]$$

Pozn.: Podle normy je nutné při dimenzování vedení na úbytek napětí:

- 1) počítat s měrným odporem při 60°C ($\rho_{Cu} = 0,0217 \mu\Omega\text{m}$, $\rho_{Al} = 0,0359 \mu\Omega\text{m}$)
- 2) s nejmenším elektrickým průřezem, který je 95% jmenovitého průřezu (např. pro lana AlFe = součet S všech Al drátů)

Tab. č. 6-8

Činný a indukční odpor kabelů do 1 kV a venkovní vedení

Průřez mm ²	Činný odpor při teplotě 60 °C R_{κ} [Ω km ⁻¹]			Indukční reaktance [Ω km ⁻¹] X_{κ}								
	Cu	Al	AlFe 6	kabelů (Cu i Al)		venkovní vedení*)						
				s kovovým pláštěm	bez kovového pláště	Cu		AlFe 6				
						d = 40 cm	d = 50 cm	d = 40 cm	d = 50 cm			
1,5	14,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,6	8,70	14,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	5,43	8,97	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	3,62	5,98	—	—	0,099 až 0,107	0,088 až 0,094	—	—	—	—	—	—
10	2,17	3,59	—	—	0,094 až 0,102	0,083 až 0,089	0,346	0,360	—	—	—	—
16	1,36	2,24	2,18	—	0,089 až 0,097	0,079 až 0,085	0,338	0,352	0,327	0,341	—	—
25	0,87	1,43	1,39	—	0,085 až 0,093	0,075 až 0,081	0,325	0,339	0,313	0,327	0,316	—
35	0,62	1,02	0,97	—	0,083 až 0,091	0,073 až 0,079	0,311	0,325	0,302	0,316	0,305	—
50	0,434	0,718	0,69	—	0,081 až 0,089	0,071 až 0,077	0,300	0,314	0,291	0,305	0,293	—
70	0,310	0,513	0,501	—	0,079 až 0,087	0,069 až 0,075	0,287	0,301	0,279	0,293	0,284	—
95	0,229	0,378	0,369	—	0,078 až 0,086	0,068 až 0,074	0,279	0,293	0,270	0,284	0,274	—
120	0,181	0,299	0,271	—	0,078 až 0,086	0,068 až 0,072	0,271	0,285	0,260	0,274	0,268	—
150	0,145	0,239	0,223	—	0,077 až 0,085	0,066 až 0,072	0,264	0,277	0,254	0,268	0,268	—
185	0,117	0,194	0,180	—	0,077 až 0,085	0,065 až 0,071	0,257	0,271	0,247	0,261	0,261	—
240	0,090	0,149	—	—	0,077 až 0,085	0,065 až 0,071	—	—	—	—	—	—

*) d je vzdálenost mezi vodiči

2) Vedení stř., 1f

- úbytek napětí $\Delta U = |\bar{U}_1| - |\bar{U}_2|$ (rozdíl velikosti napětí v bodech 1, 2) \rightarrow závisí na:
 - činném odporu R
 - induktivní reaktanci X
 - účinníku $\cos\varphi$
 - protékajícím proudem I

viz **obecný výpočet**

příčemž:

- 1) uvažujeme jen induktivní zátěž (převažuje; pro kapacitní \rightarrow záměna znamének)
- 2) při $\cos\varphi > 0,5$ (tj. $\varphi < 60^\circ$) můžeme zanedbat část označenou c .



$$\Delta U = R \cdot I \cdot \cos j + X \cdot I \cdot \sin j$$

- dos. za $R = 2 \cdot R_K \cdot l$, $X = 2 \cdot X_K \cdot l$ (viz tab. 6-8)

$$I = \frac{P}{U \cdot \cos j}$$

$$\Delta U = 2 \cdot R_K \cdot l \cdot \frac{P}{U \cdot \cos j} \cdot \cos j + 2 \cdot X_K \cdot l \cdot \frac{P}{U \cdot \cos j} \cdot \sin j = \frac{2 \cdot P \cdot l}{U} \cdot (R_K + X_K \cdot \operatorname{tg} j)$$

kde: R_K, X_K [Ω/km] \rightarrow 1 [km]

- **procentní úbytek**

$$\Delta u \% = \frac{\Delta U}{U} \cdot 100 = \frac{200 \cdot P \cdot l}{U^2} \cdot (R_K + X_K \cdot \operatorname{tg} j)$$

3) Vedení stř., 3f

- stejný vztah pro ΔU ve fázi 3f vedení jako pro 1f vedení

$$\Delta U_f = R \cdot I \cdot \cos j + X \cdot I \cdot \sin j$$

- ale dos.:

$$I = \frac{P}{3 \cdot U_f \cdot \cos j} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos j}$$

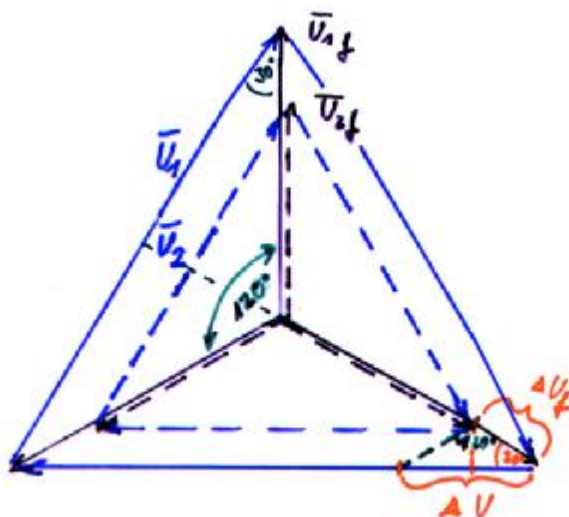
$$R = R_K \cdot l, \quad X = X_K \cdot l \quad \dots \text{hodnoty pro jednoduchou délku}$$

$$\Delta U_f = \frac{R_K \cdot l \cdot P}{\sqrt{3} \cdot U} + \frac{X_K \cdot l \cdot P}{\sqrt{3} \cdot U} \cdot \operatorname{tg} j$$

- úbytek sdruženého napětí $\Delta U = \sqrt{3} \cdot \Delta U_f$ (viz pozn.)

$$\Delta U = \frac{R_K \cdot l \cdot P}{U} + \frac{X_K \cdot l \cdot P}{U} \cdot \operatorname{tg} j$$

Pozn.: Znázornění vztahu mezi úbytkem sdruženého a fázového napětí:



$$\frac{\Delta U}{\Delta U_f} = \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot \Delta U_f$$

Obr. 6-5:

Dimenzování podle úbytku napětí

- při daném úbytku napětí ΔU nebo $\Delta u\%$ vypočítáme potřebný průřez vedení

$$1) \text{ ss: } S = \frac{2 \cdot r \cdot l \cdot I}{\Delta U} = \frac{200 \cdot r \cdot l \cdot I}{\Delta u\% \cdot U} = \frac{200 \cdot r \cdot l \cdot P}{\Delta u\% \cdot U^2}$$

$$2) \text{ stř., 1f: } R_K + X_K \cdot \text{tg}j = \frac{\Delta U \cdot U}{2 \cdot P \cdot l} = \frac{\Delta u\% \cdot U^2}{200 \cdot P \cdot l}$$

$$3) \text{ stř., 3f: } R_K + X_K \cdot \text{tg}j = \frac{\Delta U \cdot U}{P \cdot l} = \frac{\Delta u\% \cdot U^2}{100 \cdot P \cdot l}$$



Podle tabulky k odhadnutým R_K , $X_K \rightarrow S$ a zkontrolovat.

6.4.3 Příklady:

ad 1)

I.) Jaký úbytek napětí bude v hliníkovém vedení o průřezu 25 mm^2 , délce 70 m, je-li na konci vedení odebrán při napětí 220 V proud 50 A?

$$DU = \frac{2 \cdot r \cdot l}{S} \cdot I = \frac{2 \cdot 0,0359 \cdot 70}{25} \cdot 50 = 10,05 \text{ V}$$

$$Du\% = \frac{DU \cdot 100}{U} = \frac{10,05 \cdot 100}{220} = 4,57 \%$$

- s použitím tabulky - pro 25 mm^2 a Al vedení $\rightarrow R_K = 1,43 \text{ } \Omega/\text{km}$

$$DU = 2 \cdot R_K \cdot l \cdot I = 2 \cdot 1,43 \cdot 0,070 \cdot 50 = 10,01 \text{ V}$$

II.) Určete průřez hliníkového vedení vedoucího ke spotřebiči na napětí 220V s příkonem 12 kW, který je umístěn ve vzdálenosti 25 m. Úbytek napětí nesmí překročit 4 %.

$$S = \frac{2 \cdot r \cdot l \cdot 100 \cdot P}{Du\% \cdot U^2} = \frac{2 \cdot 0,0359 \cdot 25 \cdot 12 \cdot 10^5}{4 \cdot 220^2} = 11,1 \text{ mm}^2$$

↓
Volíme nejbližší vyšší normalizovaný, tj. $S=16 \text{ mm}^2$

- s použitím tabulky → potřebujeme R_K a k němu odečteme S

$$R_K = \frac{Du\% \cdot U^2}{200 \cdot l \cdot P} = \frac{4 \cdot 220^2}{200 \cdot 0,025 \cdot 12000} = 3,23 \text{ } \Omega/\text{km}$$

↓
Nejbližší nižší $R_K = 2,24 \text{ } \Omega/\text{km} \rightarrow S = 16 \text{ mm}^2$ (S hledáme k menšímu R_K , protože jsou k sobě nepřímo úměrné)

ad 2)

Jaký průřez by muselo mít jednofázové vedení AlFe6, aby při přenosu 2 kW při $\cos\varphi = 0,9$ na vzdálenost 600 m nebyl úbytek větší než 5%. Napětí na počátku vedení je 230 V a vzdálenost mezi vodiči je 50 cm.

- při $\cos\varphi = 0,9$ je $\text{tg}\varphi = 0,48$

$$\Delta u\% = \frac{200 \cdot P \cdot l}{U^2} \cdot (R_K + X_K \cdot \text{tg}\varphi)$$

$$R_K + X_K \cdot \text{tg}\varphi = \frac{\Delta u\% \cdot U^2}{200 \cdot P \cdot l} = \frac{5 \cdot 230^2}{200 \cdot 2000 \cdot 0,6} = 1,10 \text{ } \Omega/\text{km}$$

Zvolíme z tab.: $R_K = 0,97 \text{ } \Omega/\text{km}$; $X_K = 0,316 \text{ } \Omega/\text{km}$

- kontrola: $0,97 + 0,316 \cdot 0,48 = 1,12 \text{ } \Omega/\text{km} > 1,10 \text{ } \Omega/\text{km}$

↓
 $S = 35 \text{ mm}^2$ NEVYHOVUJE

Vezmeme nejbližší vyšší, tj. $S = 50 \text{ mm}^2$, $R_K = 0,69 \text{ } \Omega/\text{km}$; $X_K = 0,305 \text{ } \Omega/\text{km}$

- kontrola: $0,69 + 0,305 \cdot 0,48 = 0,836 \text{ } \Omega/\text{km} < 1,10 \text{ } \Omega/\text{km} \rightarrow \text{VYHOVUJE}$

ad 3)

Čerpací stanice je vzdálena od transformovny 800 m. Je připojena 3f vedením a má příkon 15 kW při $\cos\varphi = 0,82$ a jmenovitém napětí 400V. Jsou použity vodiče AlFe6, které mají průřez 50 mm^2 a vzájemnou vzdálenost 40 cm. Určete úbytek napětí.

- z tab. pro AlFe6, $S = 50 \text{ mm}^2$ a $d = 40 \text{ cm}$: $R_K = 0,69 \text{ } \Omega/\text{km}$, $X_K = 0,291 \text{ } \Omega/\text{km}$

- pro $\cos\varphi = 0,82$ je $\text{tg}\varphi = 0,696$

$$DU = \frac{l \cdot P}{U} \cdot (R_K + X_K \cdot \text{tg}\varphi) = \frac{0,8 \cdot 15000}{400} \cdot (0,69 + 0,291 \cdot 0,696) = 26,78 \text{ V}$$

$$Du\% = \frac{DU}{U} \cdot 100 = \frac{26,78 \cdot 100}{400} = 6,69 \%$$

6.5 Dimenzování vedení s ohledem na účinky zkratových proudů

Správně navržené vedení musí odolávat:

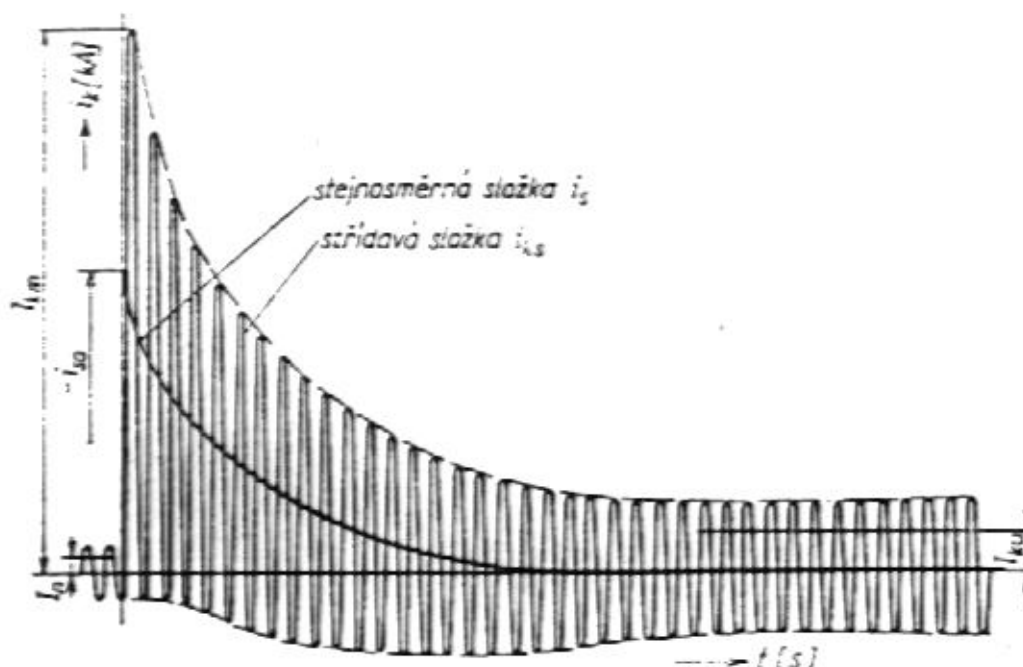
- dynamickým účinkům zkratových proudů
- tepelným účinkům zkratových proudů

6.5.1 Dynamické síly

Vznikají elektromagnetickým působením proudů v sousedních vodičích a jsou jím přímo úměrné.

Největší silový ráz způsobuje první amplituda zkratového proudu, tzv.:

- **nárazový (dynamický) zkratový proud** $I_{km} = \text{max.}$ hodnota nesouměrného zkratového proudu (viz obr. 6-6)



Obr. 6-6: Průběh zkratového proudu

$$I_{km} = K \cdot \sqrt{2} \cdot I_k''$$

kde: I_k'' ... počáteční rázový zkratový proud

K ... konstanta závislá na vzdálenosti od místa zkratu → ČSN 38 04 11
(viz tab. 6-9)

např.: 1,8 - 2 ... svorky alternátoru
1,7 ... vvn soustava
1,6 ... vn
1,4 ... nn (venkovní vedení)
1,3 ... nn (kabely)

Tabulka 6-7: Hodnoty součinitele K pro výpočet nárazového zkratového proudu podle čl. 4.3.5

Místo zkratu	bez asynchr. motorů	s asynchr. motory ¹⁾
za alternátory do 55 MW ¹⁾	1,95	2,7
v soustavě vvn, zvn	1,7	—
v soustavě vn	1,6	2,4
v soustavě nn	1,4	—
v kabelovém rozvodu nn ²⁾	1,3	1,9
za transformátory ³⁾		
vvn/vn nebo vn/nn	1,7	2,5
vn/nn do 250 kVA včetně	1,3	1,9
do 630 kVA včetně	1,5	2,1
do 1600 kVA včetně	1,6	2,3

POZNÁMKA 1 — Pro zkrat v blízkosti alternátoru nebo za blokovým transformátorem;
 POZNÁMKA 2 — Pro zkrat vzdálený od napájecího transformátoru i alternátoru (impedance mezi místem zkratu a napájecím transformátorem je větší než 10 % ze sousledné impedance zkratového obvodu);
 POZNÁMKA 3 — Pro zkrat v blízkosti sekundární strany transformátoru (impedance mezi místem zkratu a napájecím transformátorem je do 10 % sousledné impedance zkratového obvodu);
 POZNÁMKA 4 — Hodnoty součinitele K ve sloupci II slouží k orientačnímu stanovení nárazového zkratového proudu v el. rozvodu s asynchronními motory. Ve vztahu (41) se přitom použije hodnota počátečního rázového zkratového proudu stanovená bez příspěvku asynchronních motorů.

Dynamické účinky zkratových proudů, tj. mechanické namáhání jimi způsobené, je nutné kontrolovat tam, kde jde o **holé profilové (tuhé) pevně uložené vodiče** v rozvodném zařízení (např. přípojnice) ČSN 33 30 20

Odolnost vodičů vůči **silovým účinkům** zkratových proudů je možno vyjádřit ze vztahu pro velikost síly, kterou na sebe působí 2 vodiče o délce l a vzdálenosti a , kterými prochází proud I a které mezi sebou svírají úhel α ($\alpha = 90^\circ$)

$$F = B \cdot I \cdot l \cdot \sin \alpha = m_0 \cdot H \cdot I \cdot l = m_0 \cdot \frac{I}{2 \cdot p \cdot a} \cdot I \cdot l = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{I^2}{a} \cdot l \quad [\text{N}]$$

kde: B [T] ... magnetická indukce $B = \mu_0 \cdot H$

H [A/m] ... intenzita magnetického pole $H = \frac{I}{2 \cdot p \cdot a}$

μ_0 [H/m] ... permeabilita vakua $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ H/m

Uvažujeme-li sílu při největším zkratovém proudu $I_{km} \rightarrow$ velikost síly (viz ČSN 38 17 54)

$$F = 2 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \frac{I_{km}^2}{a} \cdot l \cdot 10^{-7}$$

↑
 k_1, k_2

tzv. **ohybová síla**

kde: k_1 ... činitel tvaru vodiče respektující rozložení proudu po průřezu vodiče

k_2 ... činitel respektující uspořádání vodičů a fázový posun proudů

Síla F způsobuje **ohybové namáhání** σ

$$s = \frac{F \cdot l}{W_0} \quad [\text{Pa}]$$

$$s \leq s_{dovol}$$

kde: W_0 ... průřezová plocha kolmá na směr F

s_{dovol} ... např. odvozeno z meze pružnosti materiálu (pro Al: 45 MPa, pro Cu: 100 MPa)

$$W_o \geq \frac{F.l}{S_{dovol}}$$

Pozn.: Účinkům F musí odolávat nejen vodiče silového rozvodu, ale i podpěrné izolátory a další konstrukční prvky, na které se síly přenášejí.

Účinkům nárazového zkratového proudu lze čelit:

- v rozvodech nad 1kV → zejména vhodnou volbou druhu vedení a jeho upevnění
- v rozvodech nn → dyn. síly jsou významné jen v blízkosti silných zdrojů (transformátorů)
 - účinky opět hospodárně eliminujeme upevněním vedení

Tím je možno dosáhnout zvětšení odolnosti, aniž je třeba nadměrně dimenzovat.

6.5.2 Tepelné účinky zkratového proudu

Jsou dány působením časově proměnného zkratového proudu po dobu trvání zkratu t_k na vodič.

$$I_{ke} = \sqrt{\frac{\int_0^{t_k} i_k^2(t) dt}{t_k}}$$

Vyjadřují se pomocí tzv. **ekvivalentního oteplovacího zkratového proudu** I_{ke} = konstantní proud, který způsobí ve stejném čase stejné oteplení vodiče jako proměnný zkratový proud (fiktivní efektivní hodnota proudu stálé velikosti) – viz obr.6-7

$$I_{ke} = k_e \cdot I_k''$$

kde: k_e ... konst. závislá na době zkratu – norma ČSN 38 04 11 (tab. 6-10)

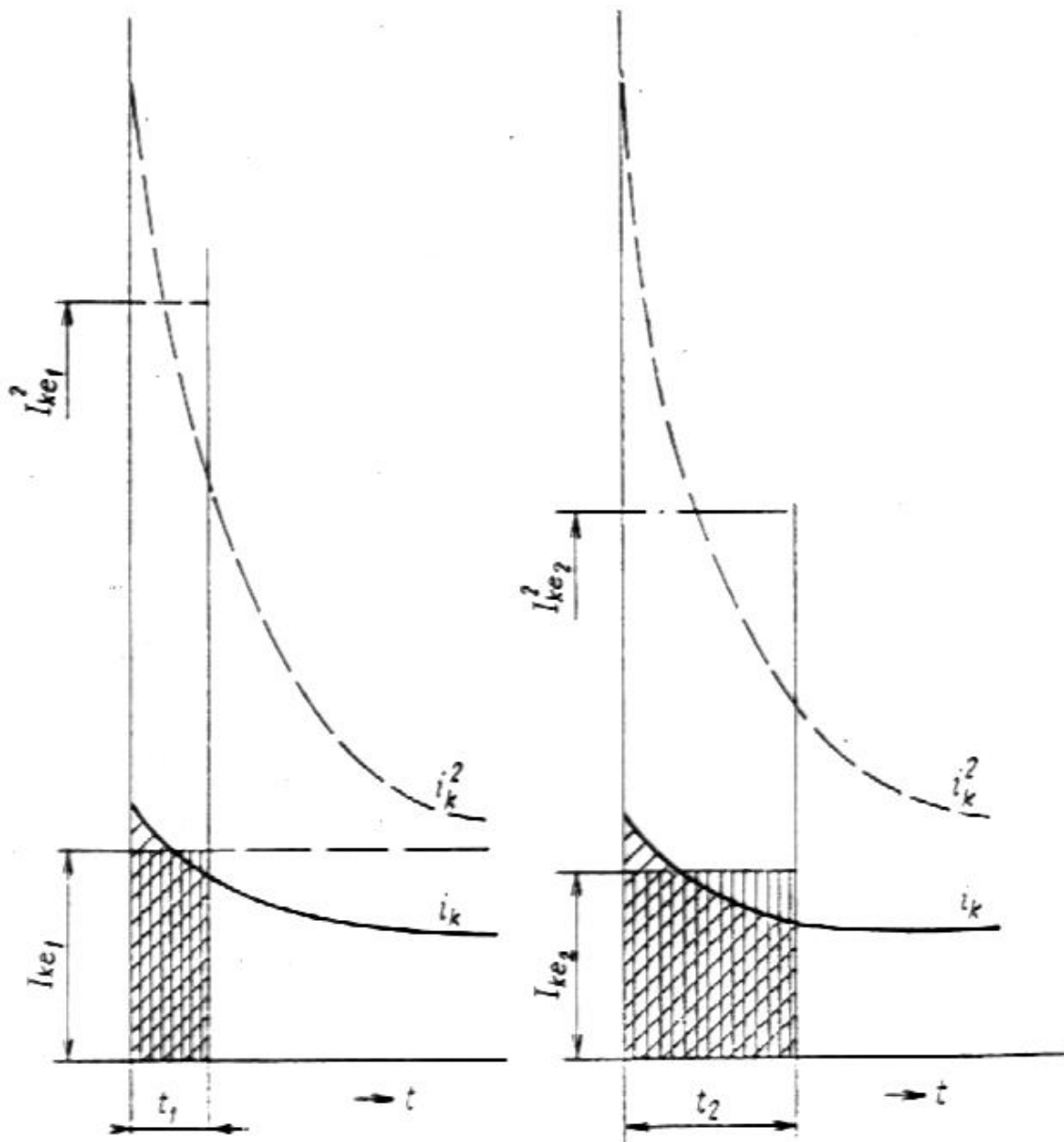
Kontrolu na oteplení vodičů díky zkrat. proudům provádíme:

- u **kabelů a izolovaných vodičů** (výjimečně u holých) vn
- u vedení nn, kde je jištění předřadnou pojistkou či jističem, se nedělá (ČSN 33 30 20)

Doba trvání zkratu je natolik krátká, že se vyvinuté **teplo nestačí odvést** do okolí → nashromáždí se ve vodičích → vodič zvýší svoji teplotu z ϑ_1 před zkratem na ϑ_2 po zkratu.

↓

Při nedostatečném dimenzování → **ničivé účinky** (poškození izolace, u holých vodičů se snižuje mechanická pevnost)



Obr. 67 Ekvivalentní oteplovací proud pro různé trvání zkratu

Tabulka 6-10: Součinitele k , pro výpočet ekvivalentního oteplovacího proudu bez uvažování vlivu asynchronních motorů

Místo zkratu	T_k (s)	k , pro t_k (s)								
		0,02	0,035	0,05	0,08	0,1	0,2	0,5	1,0	3,0
za alternátorem do 55 MW ¹⁾	0,161	1,65	1,60	1,58	1,54	1,50	1,46	1,23	1,08	1,03
v soustavě ²⁾										
vvn a zvn	0,03	1,44	1,32	1,24	1,16	1,13	1,07	1,03	1,01	1,00
vn	0,02	1,35	1,24	1,17	1,11	1,09	1,05	1,02	1,01	1,00
nn	0,01	1,24	1,15	1,10	1,07	1,05	1,03	1,01	1,00	1,00
v kabelovém rozvodu nn ²⁾	0,008	1,18	1,11	1,08	1,05	1,04	1,02	1,01	1,00	1,00
za transformátory ³⁾										
vvn/vn nebo vn/vn	0,036	1,49	1,37	1,29	1,20	1,17	1,09	1,04	1,02	1,01
vn/nn do 250 MVA včetně	0,008	1,18	1,11	1,08	1,05	1,04	1,02	1,01	1,00	1,00
do 630 MVA včetně	0,014	1,29	1,18	1,13	1,09	1,07	1,04	1,01	1,01	1,00
do 1600 MVA včetně	0,019	1,35	1,24	1,17	1,11	1,09	1,05	1,02	1,01	1,00

POZNÁMKY k tabulce

- 1 - Pro zkrat v blízkosti alternátoru nebo za blokovým transformátorem;
- 2 - Pro zkrat vzdálený od napájecího transformátoru i alternátoru (impedance mezi místem zkratu a napájecím transformátorem je větší než 10 % ze sousledné impedance zkratového obvodu);
- 3 - Pro zkrat v blízkosti sekundární strany transformátoru (impedance mezi místem zkratu a napájecím transformátorem je do 10 % sousledné impedance zkratového obvodu).

Teplu vyvinuté ve vodičích:

$$Q = \int_0^{t_k} R(J) \cdot i_k^2(t) \cdot dt$$

- časově proměnný proud $i_k(t)$ nahradíme ekvivalentním oteplovacím proudem I_{ke}

↓

$$Q = R(J) \cdot I_{ke}^2 \cdot t_k, \quad R(J) = R_{20} \cdot \frac{J_f + J}{J_f + 20} \quad (*)$$

kde: R_{20} [Ω] ... odpor vodiče při 20°C
 $\vartheta_f = 1/\alpha$ [°C] ... fiktivní teplota vodiče
 α [1/°C] ... teplotní součinitel odporu

Toto teplo způsobí ohřátí vodiče objemu V z teploty ϑ_1 na teplotu ϑ_k

$$Q = \int_{J_1}^{J_k} c \cdot V \cdot dJ, \quad V = S \cdot l; \quad R_{20} = r_{20} \cdot \frac{l}{S} \quad (**)$$

kde: c [kJ/kg·K] ... měrné teplo
 S [mm²] ... průřez vodiče
 l [l] ... délka vodiče
 ρ_{20} [$\mu\Omega$ m] ... měrný odpor při 20 °C

Porovnáním rovnic (*) a (**):

$$I_{ke}^2 \cdot t_k = \int_{J_1}^{J_k} \frac{c \cdot V}{R(J)} dJ = \int_{J_1}^{J_k} \frac{c \cdot V \cdot (J_f + 20)}{R_{20} \cdot (J_f + J)} dJ$$

Po integraci:

$$I_{ke}^2 \cdot t_k = \frac{c \cdot V}{R_{20}} \cdot (J_f + 20) \cdot \ln \frac{J_f + J_k}{J_f + J_1}$$

Dos. za V a R₂₀:

$$I_{ke}^2 \cdot t_k = \frac{c \cdot S^2}{r_{20}} \cdot (J_f + 20) \cdot \ln \frac{J_f + J_k}{J_f + J_1}$$

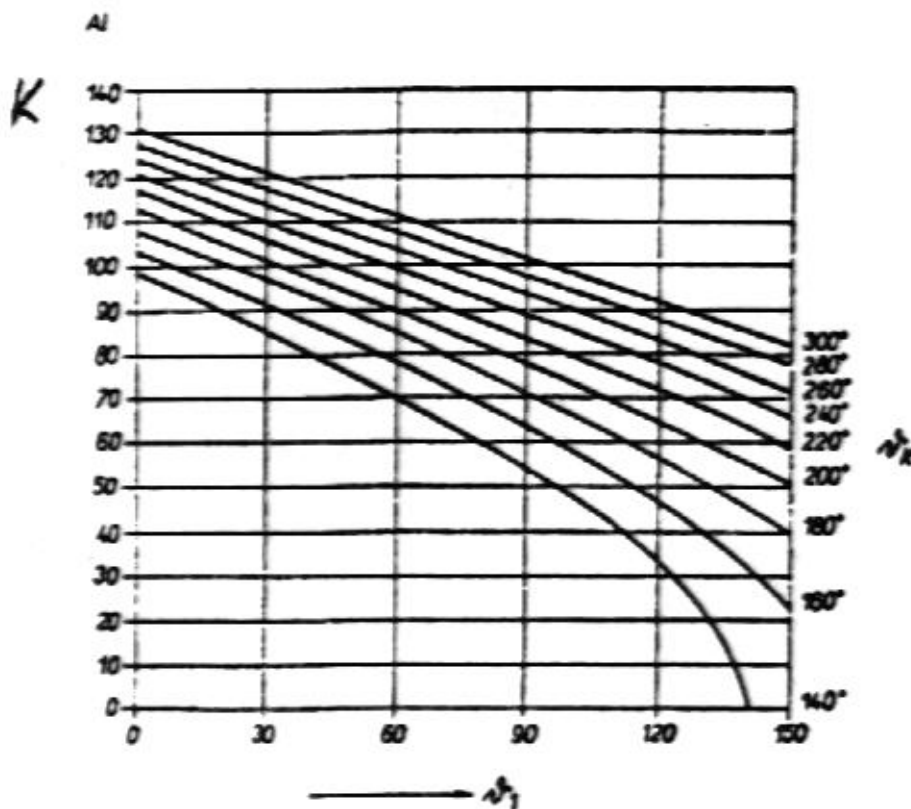
$$S = \frac{I_{ke} \cdot \sqrt{t_k}}{K}$$

$$K = \sqrt{\frac{c}{r_{20}} \cdot (J_f + 20) \cdot \ln \frac{J_f + J_k}{J_f + J_1}}$$

kde: S ... nejmenší možný průřez, který vyhovuje z hlediska tepelného namáhání zkratovými proudy

Koeficient K (viz obr. 6-8) volíme podle

- dovolené provozní teploty vodiče před zkratem ϑ_1 (nesmí být překročena při normálním provozu)
- max. dovolené teploty ϑ_k (nesmí být překročena nikdy z důvodů poškození izolace)



Obr. 6-8:

K, ϑ_1 , ϑ_k ... v normě ČSN 38 17 54

Pozn:

	c (při 0 °C) [kJ/kg.K]	ρ_{20} [$\mu\Omega\text{m}$]	ϑ_f [°C]
Cu	0,35	0,01786	234,5
Al	0,2417	0,02941	228,0
Fe	0,377	0,143	222,0

!Správným návrhem vlastní konstrukce, vedení a jištění lze omezit pravděpodobnost vzniku zkratu, nelze ho však zcela vyloučit!