

Elektrárny B1M15ENY

přednáška č. 5

**Generátory:
Konstrukce, typy
Základní vztahy
Regulace, buzení**



Ing. Jan Špetlík, Ph.D.
ČVUT FEL Katedra elektroenergetiky
E-mail: spetlij@fel.cvut.cz

Nárazový proud bude:

$$i_{p3} = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{k3} = 1,7 \cdot \sqrt{2} \cdot 25 = 59,9 \text{ kA}$$

Vrcholová síla mezi hlavními vodiči v obou případech bude:

$$F_{m3} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_{p3}^2 \cdot \frac{l}{d_m} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 59,9^2 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{0,5} = 1,242 \text{ kN}$$

Koeficienty:

$$\beta = 0,73 \quad V_\sigma \cdot V_r = 1 \quad q \cdot \sigma_{0,2} = 1,5 \cdot 120 = 180 \text{ MPa}$$

Účinky na vodiče:

1) Pasy naležato

$$Z = \frac{a \cdot b^2}{6} = \frac{0,010 \cdot 0,063^2}{6} = 6,615 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$\sigma_m = V_\sigma \cdot V_r \cdot \beta \cdot \frac{F_{m3} \cdot l}{8 \cdot Z} = 1 \cdot 0,73 \cdot \frac{1,242 \cdot 10^3 \cdot 1}{8 \cdot 6,615 \cdot 10^{-6}} = 17,1 \text{ MPa}$$

Vodiče vyhovují protože $\sigma_{tot} < q \cdot \sigma_{0,2} \quad 17,1 < 180$

2) Pasy nastojato

$$Z = \frac{0,063 \cdot 0,010^2}{6} = 1,05 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$\sigma_m = V_\sigma \cdot V_r \cdot \beta \cdot \frac{F_{m3} \cdot l}{8 \cdot Z} = 1,0,73 \cdot \frac{1,242 \cdot 10^3 \cdot 1}{8 \cdot 1,05 \cdot 10^{-6}} = 107,9 \text{ MPa}$$

Vodiče opět vyhovují protože $\sigma_{tot} < q \cdot \sigma_{0,2}$ $107,9 < 180$

Účinky na podpěrky:

1) Pasy naležato

$$\frac{0,8 \cdot \sigma_{0,2}}{\sigma_{tot}} = \frac{0,8 \cdot 120}{17,1} > 2,7 \Rightarrow V_F \cdot V_r = 2,7 \quad \alpha_{krit} = 1,1$$

$$F_D = V_F \cdot V_r \cdot \alpha \cdot F_{m3} = 2,7 \cdot 1,1 \cdot 1,242 = 3,69 \text{ kN}$$

$$T = 0,035 \text{ m}$$

$$\frac{3,69}{0,8} \cdot \frac{0,13 + 0,035}{0,13} = 5,85 \text{ kN} < P$$

Vyhovuje pro podpěrku 10 kN

2) Pasy nastojato

$$\frac{0,8 \cdot \sigma_{0,2}}{\sigma_{tot}} = \frac{0,8 \cdot 120}{107,9} = 0,889 < 1 \Rightarrow V_F \cdot V_r = 1 \quad \alpha_{krit} = 1,1$$

$$F_D = V_F \cdot V_r \cdot \alpha \cdot F_{m3} = 1 \cdot 1,1 \cdot 1,242 = 1,37 \text{ kN}$$

$$T = 0,062 \text{ m}$$

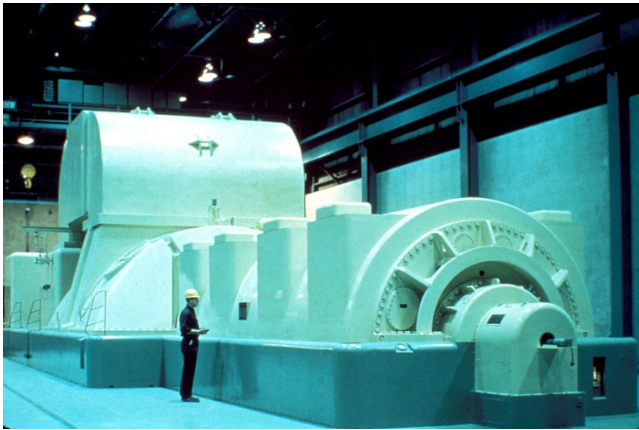
$$\frac{1,37}{0,8} \cdot \frac{0,13 + 0,062}{0,13} = 2,53 \text{ kN} < P$$

Vyhovuje pro podpěrku 5 kN

Alternátory

Pro elektrárenské aplikace se využívají:

- Synchronní stroje s hladkým rotorem (dvou nebo čtyřpólové) pro parní turbíny s výkony až 1000 MW
- Synchronní stroje s vyniklými póly (mnohapólové) pro vodní elny s výkony až stovky MW
- Asynchronní stroje s kotvou nakrátko
- Asynchronní stroje s dvojité napájeným vinutím (DFIG) s výkony až 10 MW pro VTE



Turbostroje



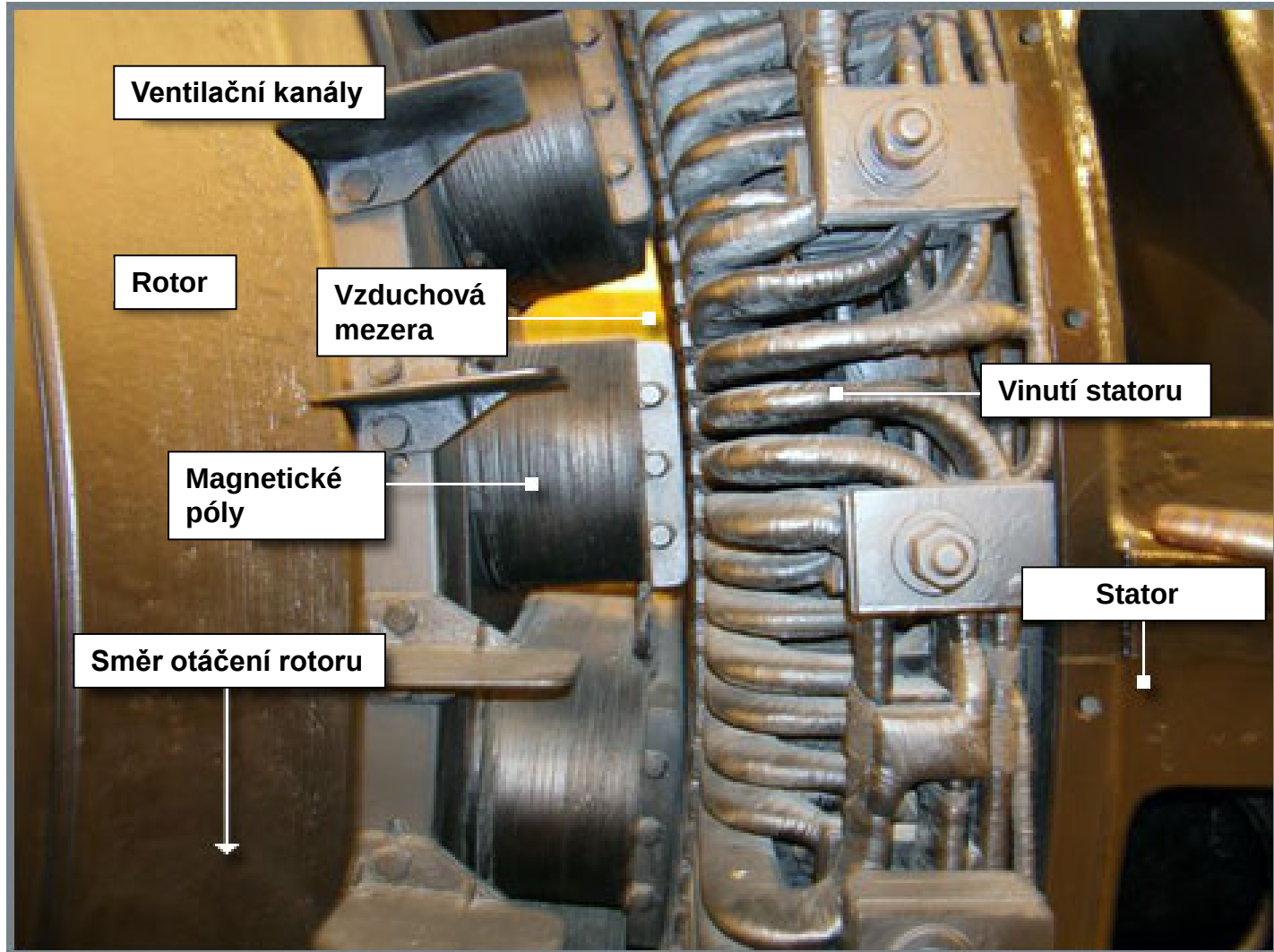
Hydrostroje



DFIG

Alternátory

Konstrukce:



Alternátory – vyvedení výkonu



Pro vyvedení větších výkonů z generátoru se užívá několik pasů na fázi jako na tomto příkladě pas 3 x Al 63x10



Užívají se lanové přetahy

Alternátory – vyvedení výkonu



Vysokoproudý systém pryskyřicí izolovaných vodičů DURESCA



Pro ještě náročnější aplikace je třeba volit systém zapouzdřených vodičů

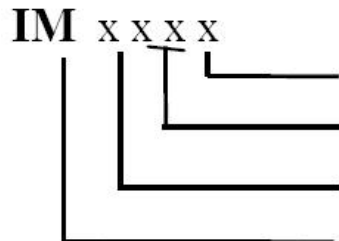
Alternátory

IM kód:

Montáž a pracovní
poloha

dle ČSN 60034-7

(platí i pro motory)



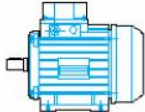
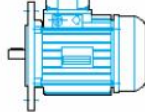
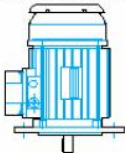
čís. znak dle provedení konce hřídelů (0÷9)

číselný znak pro způsob montáže (0÷99)

skupinové číslo tvaru stroje (0÷9)

mezinárodní označení tvaru stroje (International

Mounting

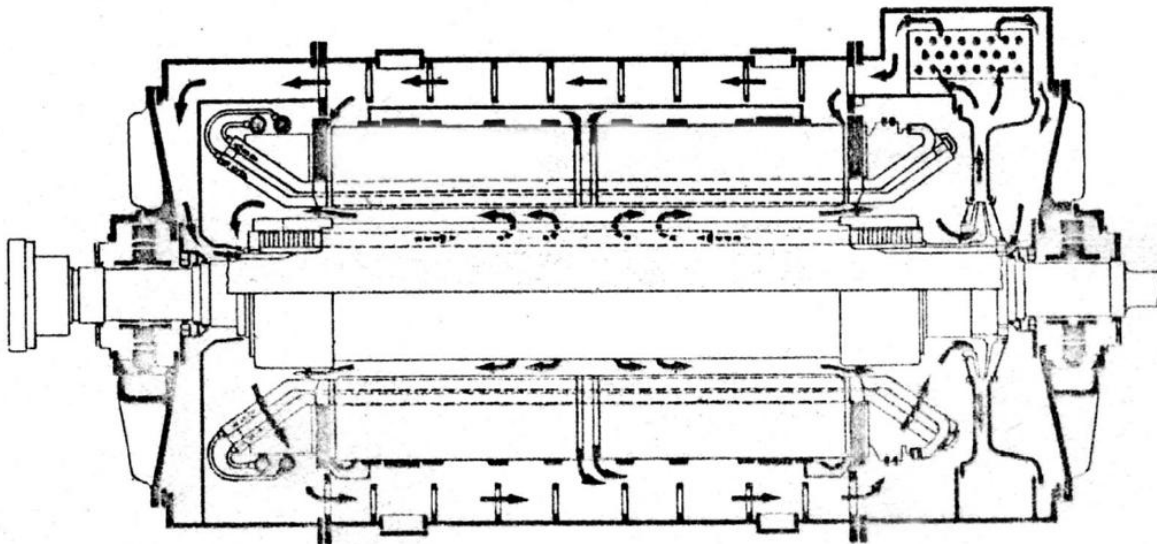
patkový s jedním válcovým koncem hřídele normální patky dole, vodorovný hřídel	IM 1001 (IM B3) 
patkový s jedním válcovým koncem hřídele normální patky vlevo (vpravo), vodorovný hřídel	IM 1051 (IM B6) 
přírubový s jedním válcovým koncem hřídele příruba na str. D, vodorovný hřídel	IM 3001 (IM B5) 
přírubový s jedním válcovým koncem hřídele příruba dole (nahore), svislý hřídel	IM 3011 (IM V1) 
patkový s jedním válcovým koncem hřídele normální patky nahore, vodorovný hřídel	IM 1071 (IM B8) 

Alternátory

IC kód: Provedení chlazení

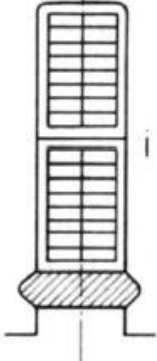
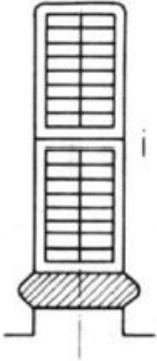
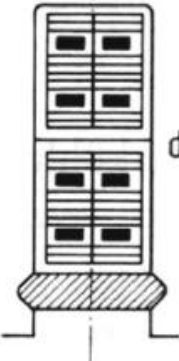
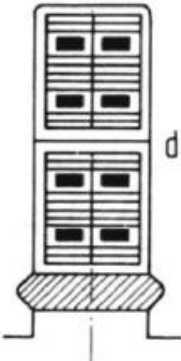
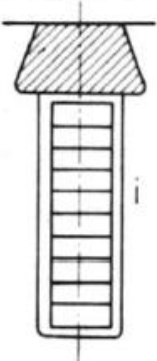
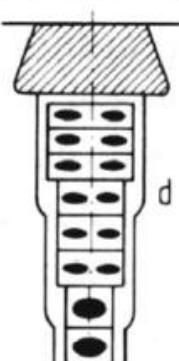
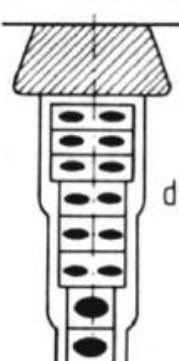
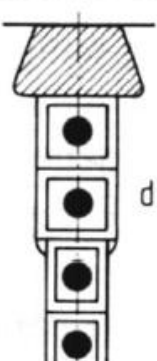
V zásadě mohou být generátory/motory s ohledem na způsob chlazení provedeny:

- S přirozeným chlazením (chlazení pouze konvekcí)
- S vlastním chlazením (na hřídeli je ventilátor závislý na otáčkách)
- S přirozeným vlastním chlazením (dva okruhy konvekce + ventilátor)
- S cizím chlazením (ventilace nezávislá na otáčkách motoru)



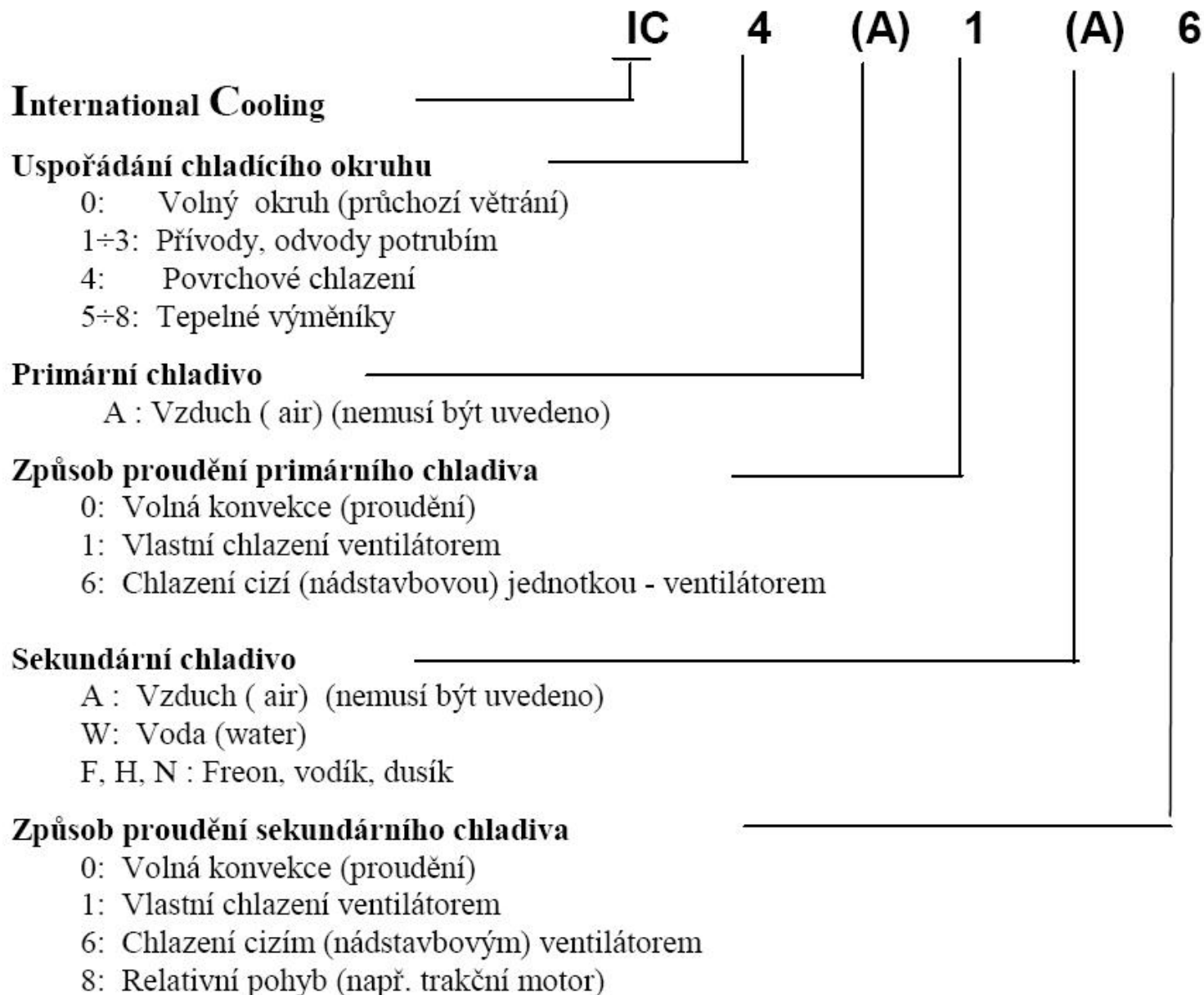
Alternátory

IC kód: Provedení chlazení

Statorová drážka				
Chlazení	Vzduch	H ₂	H ₂ O	H ₂ O
Rotorová drážka				
Chlazení	Vzduch	H ₂	H ₂	H ₂ O
Výkon v MVA	50	250	1000	2000

Alternátory

IC kód:

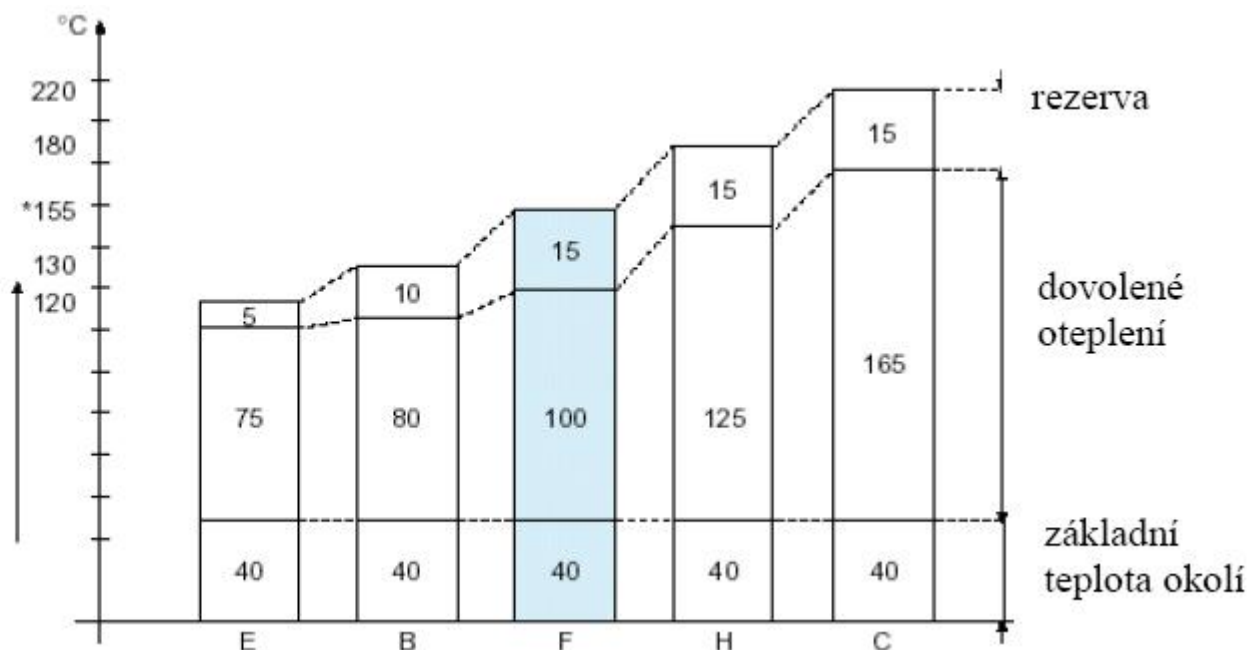


Alternátory

Třídy izolace:

Izolace je dle ČSN 33 0050 klasifikována do tříd A, E, B, F, H podle dovoleného oteplení

Třída izolace	$\Delta\theta_{\text{dov}}$ [K]	θ_{dov} [°]
A	60	100
E	75	115
B	80	120
F	100	140
H	125	165



Volba parametrů alternátoru

Jmenovitý výkon:

Odvíjí se od výkonu turbosoustrojí tj. 63 MVA / 125 MVA / 235 MVA / 588 MVA / 1176 MVA

Jmenovité napětí:

Volí se s ohledem na I_n , parametry izolace a chránitelnost bloku+části soustavy, do které je zapojen

Orientační tabulka s typickými hladinami U_n :

P_n	U_n
do 50 MW	6,3 kV
50-100 MW	10,5 kV
100-200MW	13,8 kV
200-500 MW	15,75 kV
1000 MW Temelín	24 kV

Pozn. V současné době již napěťové hladiny nejsou v ČR pevně dány, ale závisí i na std. a značné přizpůsobivosti výrobců

Rovnice synchronního stroje – ustálený stav

V ustáleném stavu platí:

$$0 = -R_0 \cdot I_0$$

$$U_d = -R \cdot I_d - X_q \cdot I_q$$

$$U_q = -R \cdot I_q + X_d \cdot I_d + X_{ad} \cdot I_f$$

$$U_f = R_f \cdot I_f + X_{ad} \cdot I_f$$

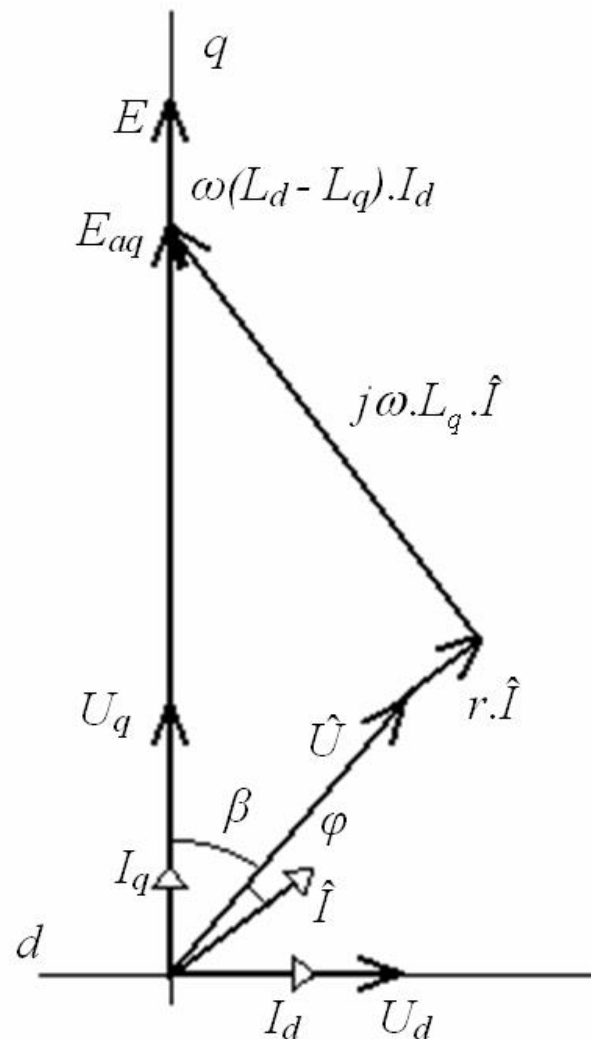
$$0 = R_D \cdot I_D$$

$$0 = R_Q \cdot I_Q$$

Fázové napětí a proudy:

$$\hat{U} = U_q + j \cdot U_d$$

$$\hat{I} = I_q + j \cdot I_d$$



Vztahy pro výkony

Elektrický moment:

$$\begin{aligned} M_e &= \frac{p}{2} \cdot (\psi_d \cdot I_q - \psi_q \cdot I_d) = \\ &= \frac{p}{2 \cdot \Omega} \cdot [-X_q \cdot I_d \cdot I_q + X_d \cdot I_d \cdot I_q + X_{ad} \cdot I_f \cdot I_q] \\ &= \frac{1}{\omega} \cdot \left[(X_d - X_q) \cdot \frac{U^2}{X_d \cdot X_q} \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta + E \cdot \frac{U}{X_d} \cdot \sin \beta \right] \end{aligned}$$

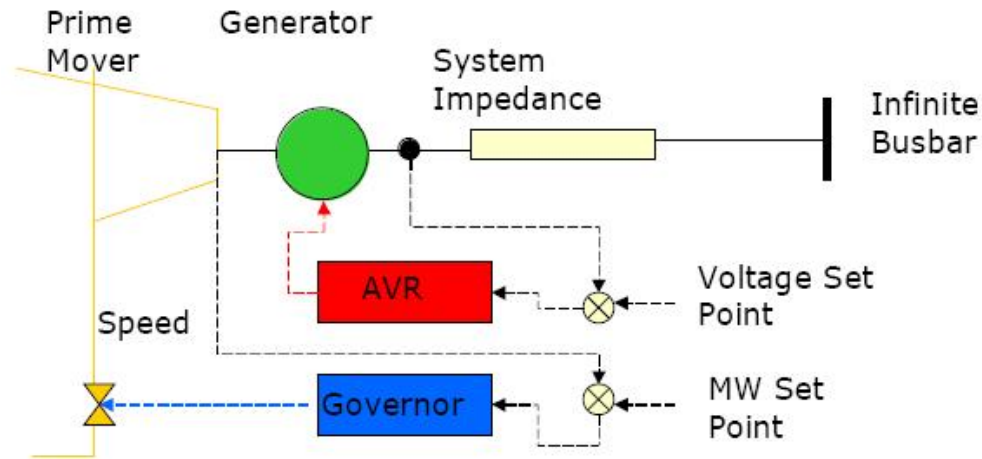
Trojfázový výkon v ustáleném stavu:

$$\hat{S} = P + j \cdot Q = 3 \cdot \hat{U}_f \cdot \hat{I}^* = 3 \cdot U_f \cdot I \cdot \cos \varphi + j \cdot 3 \cdot U_f \cdot I \cdot \sin \varphi$$

$$P = 3 \cdot U_f \cdot I \cdot \cos \varphi = \frac{U \cdot E}{X_d} \cdot \sin \beta + \frac{U^2}{2} \cdot \frac{X_d - X_q}{X_d \cdot X_q} \cdot \sin 2\beta$$

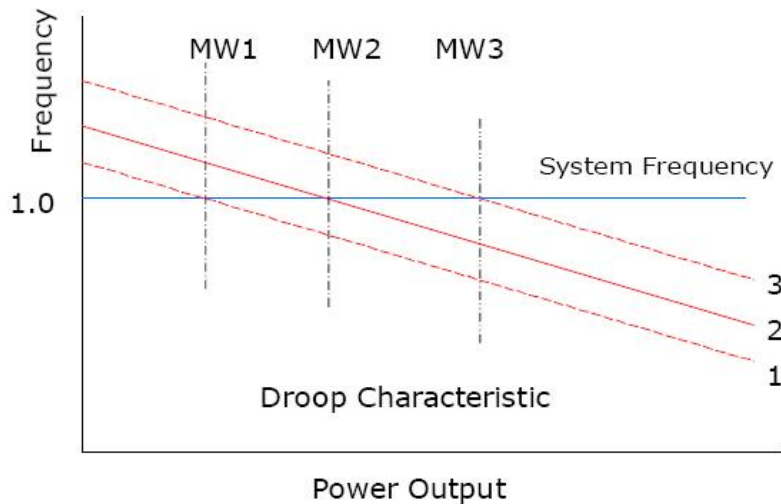
$$Q = 3 \cdot U_f \cdot I \cdot \sin \varphi = \frac{U \cdot E}{X_d} \cdot \cos \beta + \frac{U^2}{2} \cdot \frac{X_d - X_q}{X_d \cdot X_q} \cdot \cos 2\beta - \frac{U^2}{2} \cdot \frac{X_d + X_q}{X_d \cdot X_q}$$

Regulace stroje



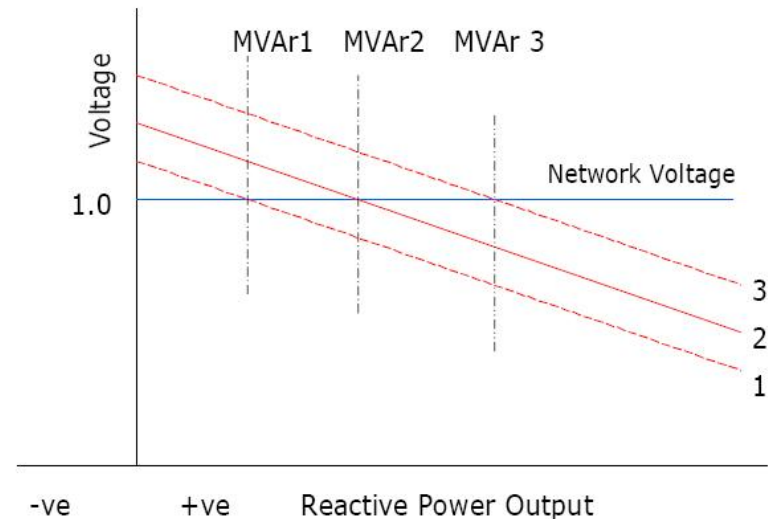
Činný výkon: regulace P-f

$$f = f_{sys} + s_P \cdot (P - P_W)$$



AVR: regulace Q-U

$$U = U_{ref} + s_Q \cdot (Q - Q_W)$$



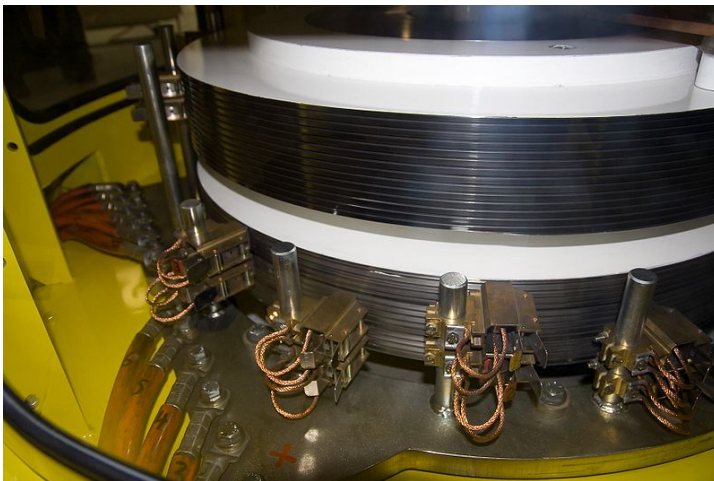
Budící systémy

Skládají se z:

- Systém zdroje budícího proudu
- Systém regulace buzení
- Systém odbuzování

Požadavky:

- Vysoká provozní spolehlivost
- Plynulá a rozsáhlá regulace budících proudů a napětí (až $2 \cdot U_{fn}$)
- Dostatečná rychlost změny budícího napětí
- Dostatečná rychlost odbuzení



Detail ss napájení přes kroužky

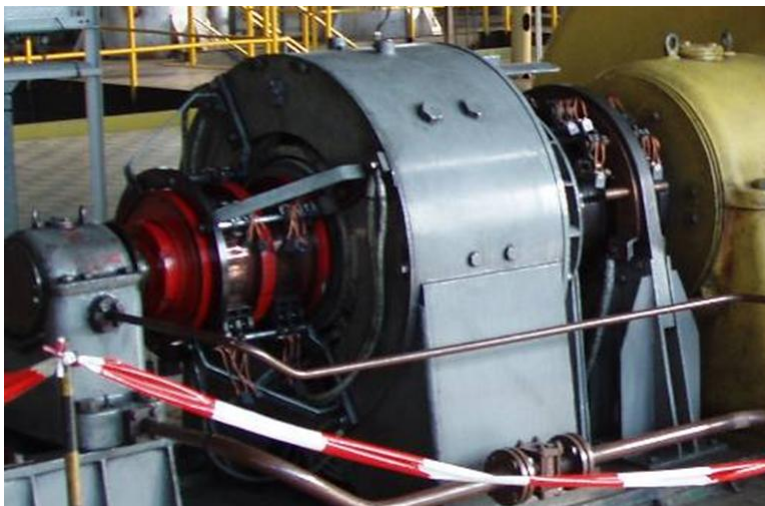
Zdroje budícího proudu

Dle provedení:

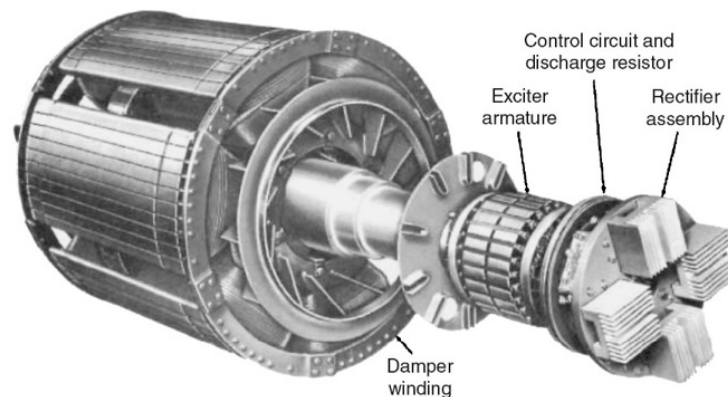
- S rotačním budičem (dynamo)
- Statický systém vyvedený na kroužky
- Statický systém v rotoru
- Systém s permanentními magnety (pouze malé aplikace)

Dle napájení:

- Odbočkou ze svorek generátoru přes trf. buzení
- Nezávislý zdroj (např. pomocný budič ss dynamo)



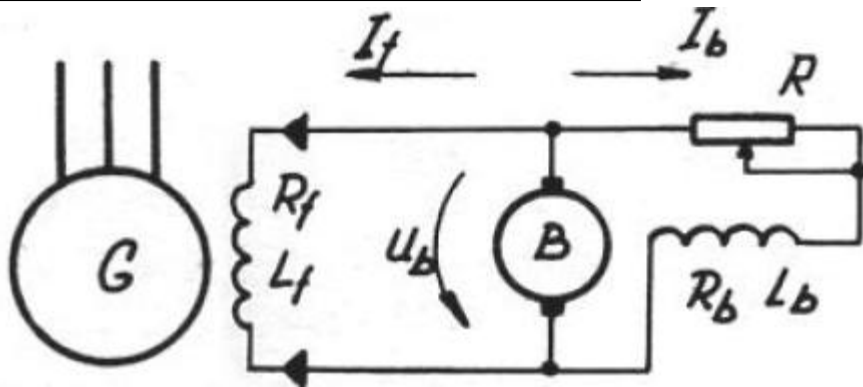
Rotační budič (s pom. budičem)



Bezkartáčový tyristorový systém integrovaný v rotoru

Zdroje budícího proudu

Budič s derivačním vinutím:

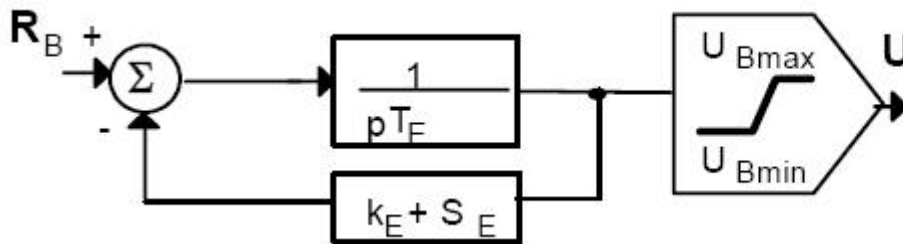


$$u_b = R_b \cdot i_b - \frac{d\psi}{dt} = R_b \cdot i_b - \frac{L_b}{R_b} \frac{du_b}{dt}$$

$$T_b = \frac{L_b}{R_b} \quad U_b = \frac{R_b}{1 + s \cdot T_b} \cdot I_b$$

$$s \cdot T_E \cdot U_b = R_B - k_E \cdot U_b$$

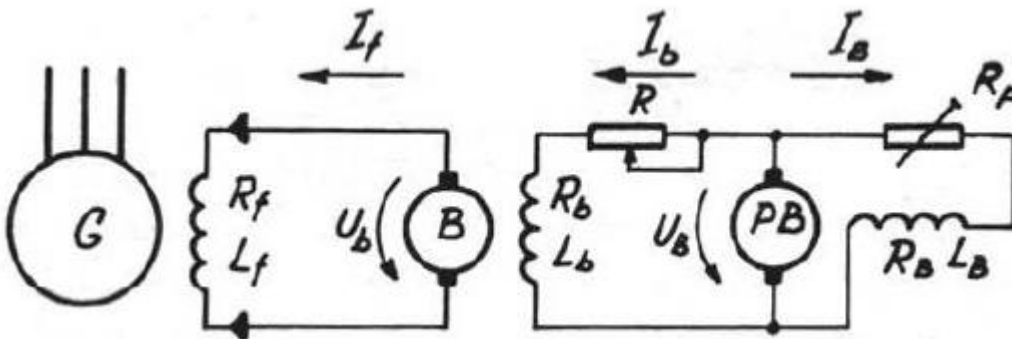
Model respektující syčení:



$S_E = A \cdot \exp(B \cdot U_B / U_{Bn})$ Přenos. fce
Funkce syčení ve tvaru:

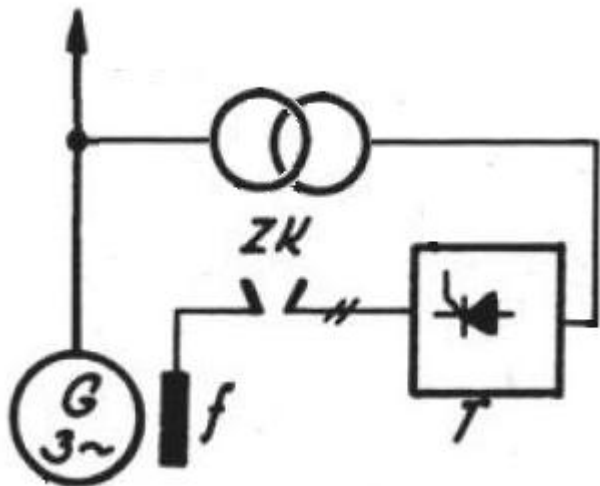
$$U_B = \frac{1}{k_E + s_E + s \cdot T_E} \cdot R_B$$

Budič s přidavným pomocným vinutím:



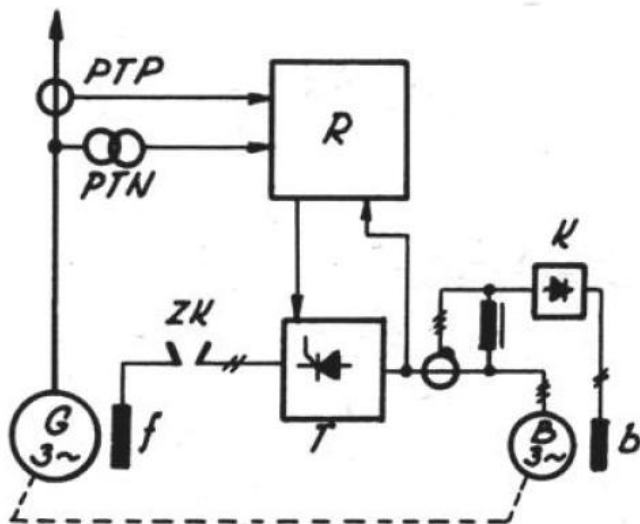
Zdroje budícího proudu

Statický budič s řízeným usměrňovačem napájený z odbočky:



Zdroj závislý na svorkovém napětí u generátoru. To může činit potíže při době regulace při změnách u_s (např. při vzdáleném zkratu)

Statický budič s řízeným usměrňovačem napájený z 3f gen:



„Nezávislý“ tyristorový budič

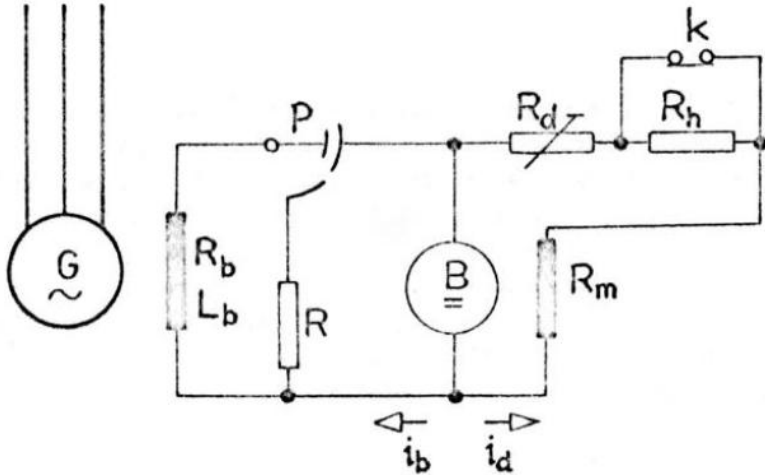
Odbuzovače

Provedení:

- s paralelním (zhášecím) odporem
- se zhášecí komorou
- invertorovým chodem budícího systému

Odbuzení zhášecím odporem

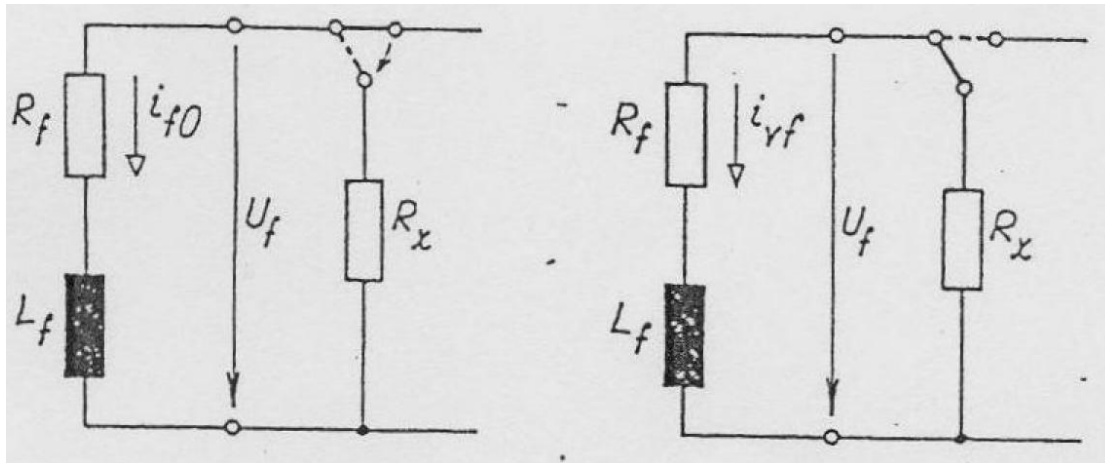
Schéma:



Dojde k sepnutí odporu R a zároveň rozpojení kontaktů k a připojení odporu Rh do budícího obvodu derivačního dynama

Volbou odporu R musí dojít k rychlému odbuzení, ale zároveň zamezení přepětí na kroužcích bud. vinutí

Zjednodušeně jde o (neuvažujeme-li tłum. vin.):



Platí:

$$u_f = L_f \cdot \frac{di_{vf}}{dt} + R_f \cdot i_{vf} = -R_x \cdot i_{vf}$$

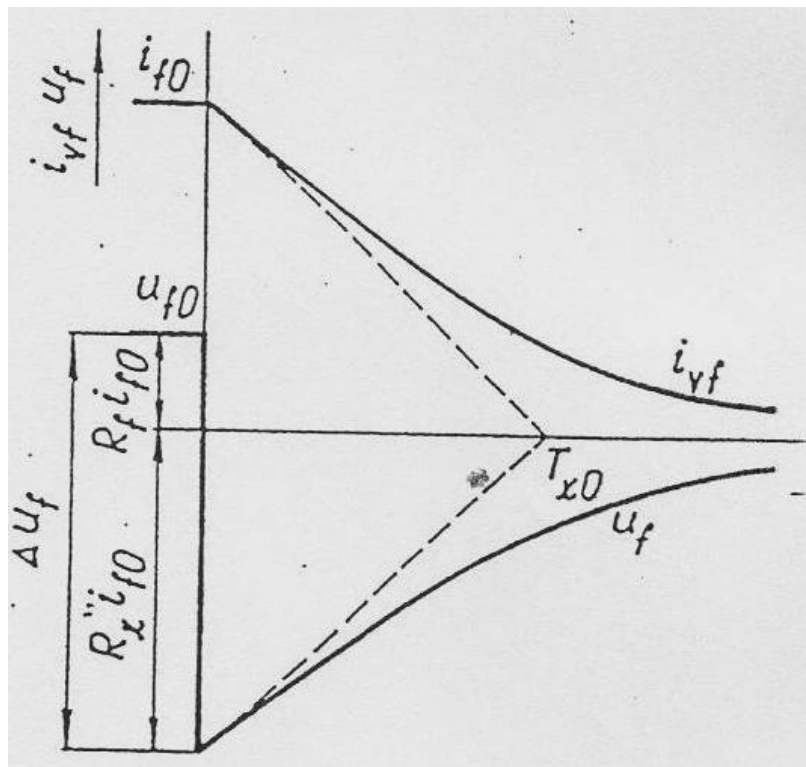
Odbuzení zhášecím odporem

Řešení:

$$i_{vf} = i_{f0} \cdot e^{-\frac{t}{T_x}} \quad u_f = -R_x \cdot i_{f0} \cdot e^{-\frac{t}{T_x}}$$

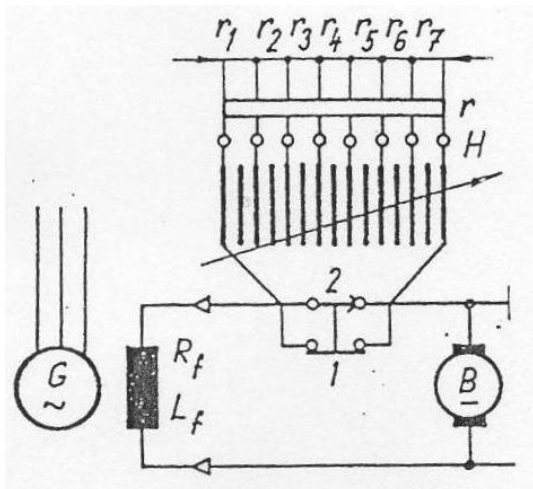
Je-li proud na počátku maximálně i_{fn} a požadujeme $u_f < 7 \cdot u_{fn}$

$$7 \cdot u_{fn} = 7 \cdot R_f \cdot i_{fn} = R_x \cdot i_{fn} \Rightarrow R_x = 7 \cdot R_f$$



Odbuzení zhášecí komorou

Schéma:

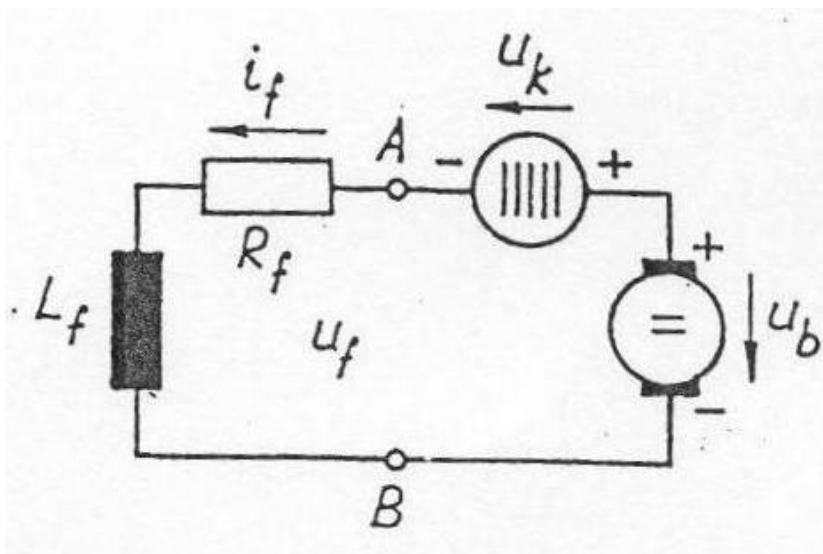


Užívá se pro alternátory vyšších výkonů.

Po rozpojení hlavních kontaktů č. 1 je proud přemostěn přes hl. kontakty 2 s indukčnostmi, které po jejich rozpojení nasměrují proud do zhášecí komory

Kombinací odporů r_1 - r_7 a celkové koncepce ZK je napětí u_k během zhášení oblouku prakticky konstantní

Zjednodušeně jde o (neuvažujeme-li tłum. vin.):



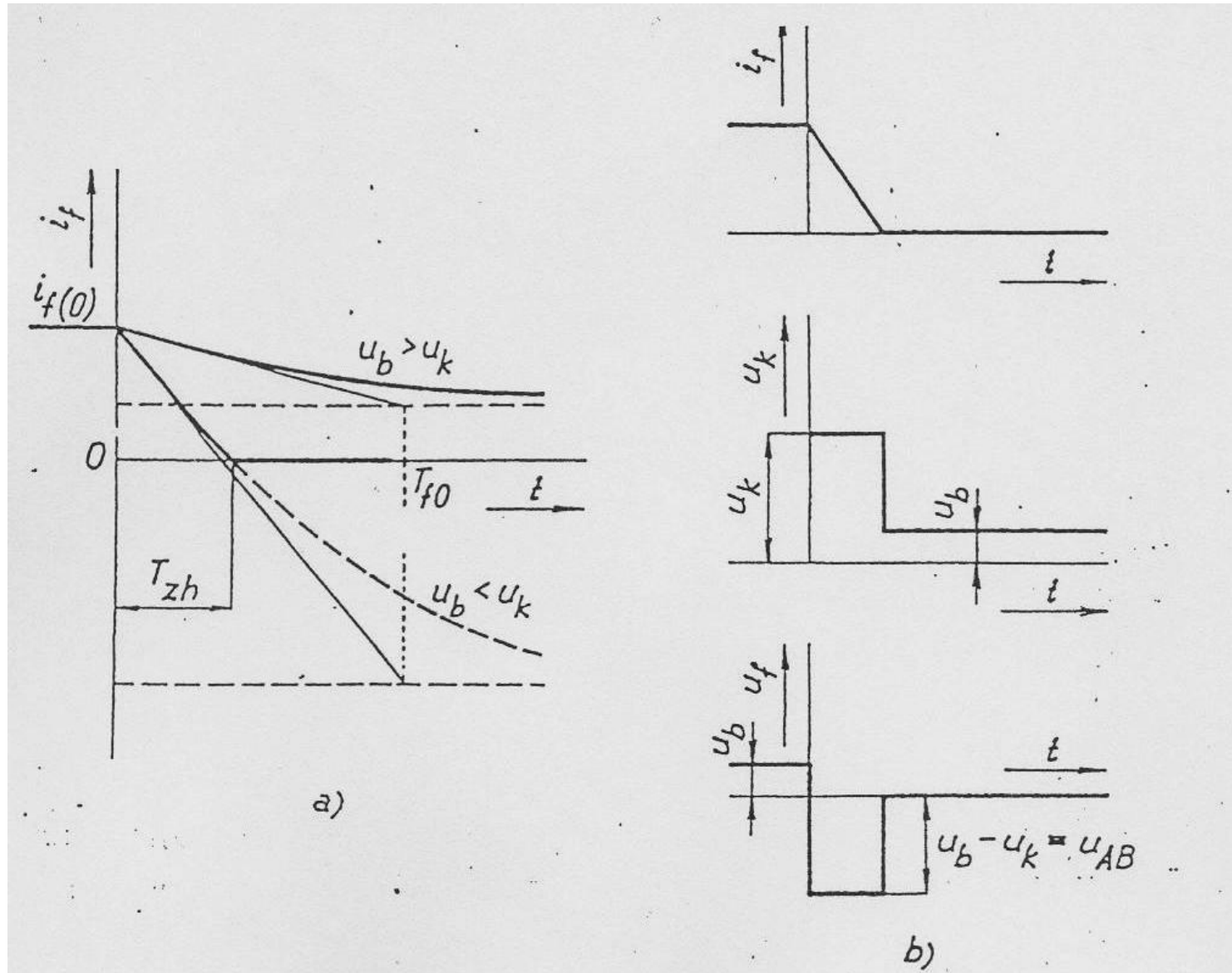
Platí:

$$i_f = \frac{1}{R_f} \left(u_b - u_k + u_k \cdot e^{-\frac{t}{T_{f0}}} \right)$$

$$T_{f0} = \frac{L_f}{R_f}$$

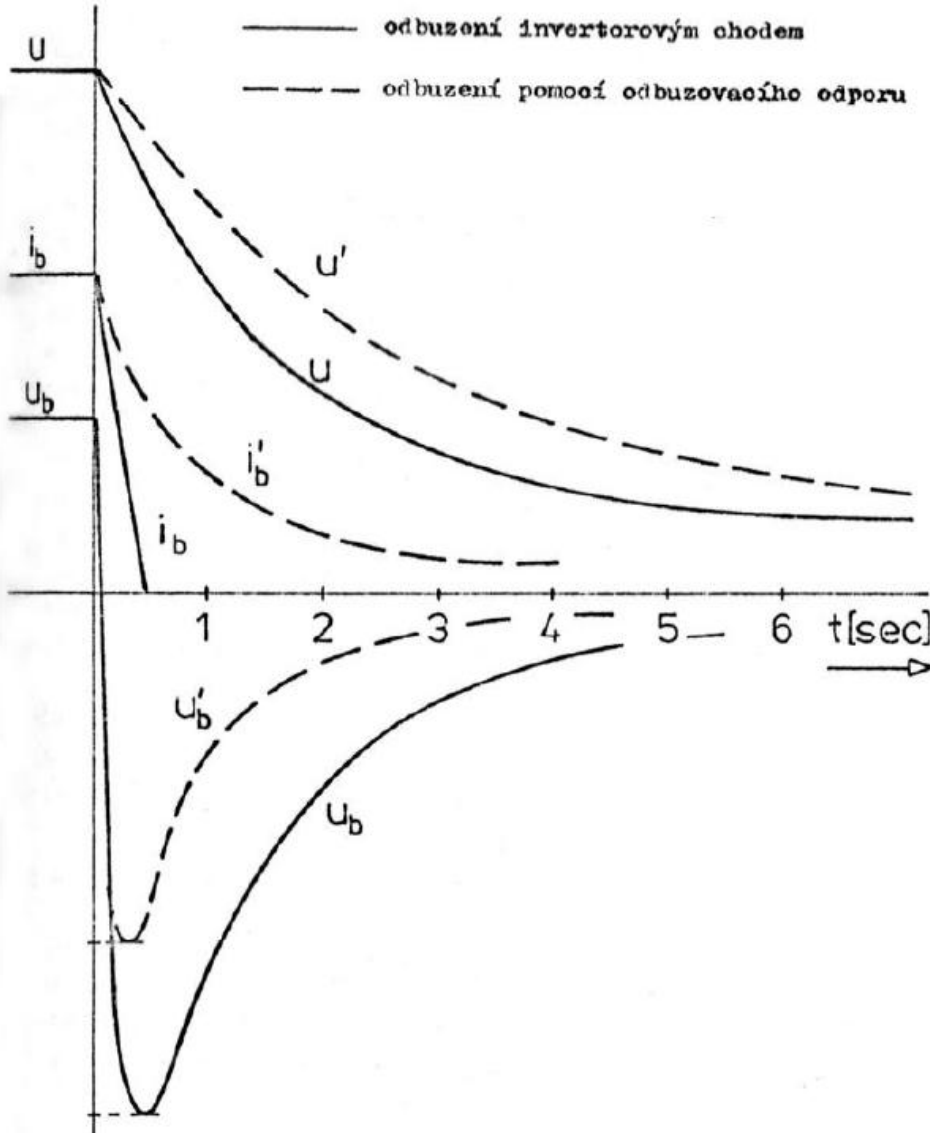
Odbuzení zhášecí komorou

Časové průběhy:



Odbuzení invertorovým chodem

Časové průběhy:



Lze použít u budících systémů s řízenými tyristory. Zajišťuje se při plánovaném odbuzování. Za havarijních podmínek se používají klasické systémy kvůli možnému značnému napětíovému namáhání tyristorů

Fázování alternátoru

Průběh připojení generátoru k síti:

Soustrojí turbína-generátor se uvede na jmenovité otáčky, nabudí na jmenovité napětí, přifázuje a poté se uvede na požadované hodnoty P a Q . Přifázování musí být provedeno s minimálními proudovými a momentovými rázy, které jsou dány zejména:

- různým sledem fází generátoru/sítě
- různou velikostí napětí generátoru/sítě
- různým fázovým rozdílem napětí generátoru/sítě
- různou frekvencí generátoru/sítě

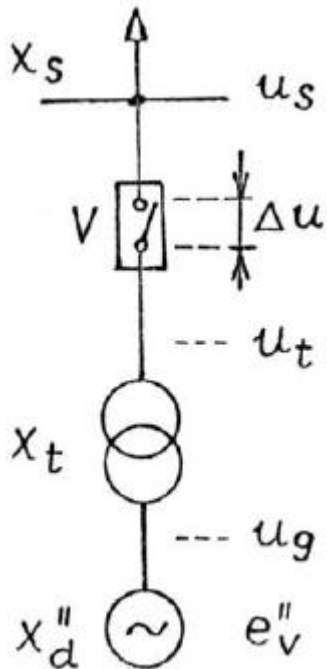
Tyto podmínky nelze splnit naprosto přesně, tolerované odchylky jsou následující:

Sled fází:

Nutno dodržet, kontrola sledu fází je dnes součástí každé multiunkční digitální ochrany bloku

Fázování alternátoru

Velikost napětí:



Před fázováním je na alternátoru rozdílové napětí Δu
Všechna napětí jsou ve fázi

Dojde k proudovému rázu:

$$i_k'' = \frac{e'' - u_s}{x_t + x_d''} = \frac{\Delta u}{x_t + x_d''}$$

Dovolená odchylka při které $i_k'' = i_n$:

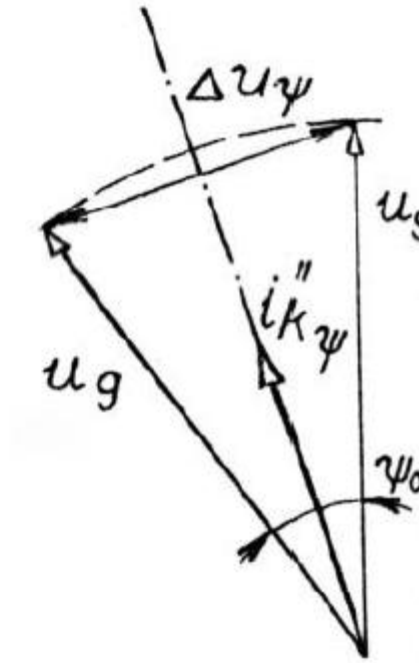
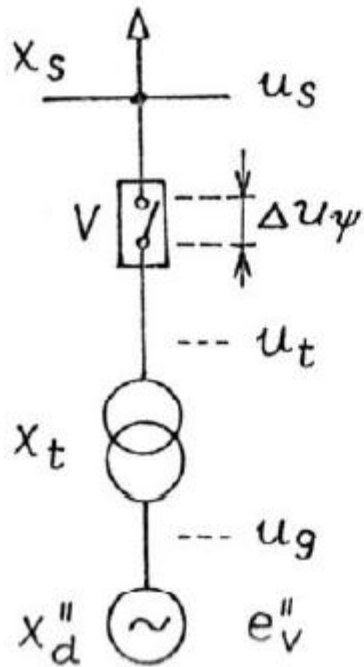
$$\Delta u_{\max} = i_k'' \cdot x_d'' = i_n \cdot x_d'' \approx 1.0,15 = 15 \%$$

Je-li $u_s < e''$ dodává během přechodného děje alternátor jalový výkon do sítě a pracuje v přebuzeném (induktivním) režimu, je-li $u_s > e''$ pracuje naopak v podbuzeném (kapacitním) režimu

Aby nedošlo k druhému případu, alternátor se mírně přebudí

Fázování alternátoru

Fázový rozdíl napětí:



$$i_k'' = \frac{e'' - u_s}{x_t + x_d''} = \frac{2u \cdot \sin \frac{\psi}{2}}{x_t + x_d''}$$

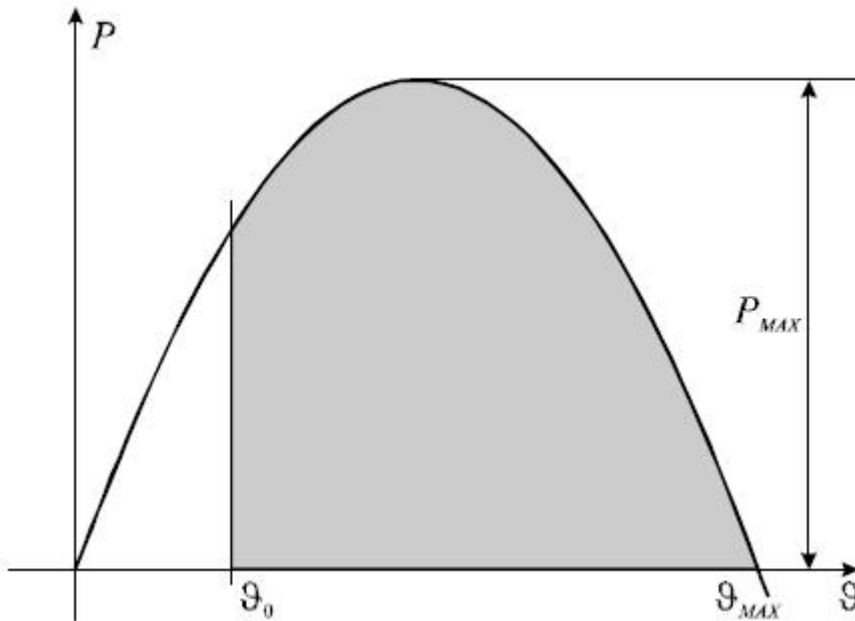
Analogicky:

$$i_k'' = i_n = \frac{2u \cdot \sin \frac{\psi_{\max}}{2}}{x_d''} \quad \psi_{\max} = 2 \cdot \arcsin \frac{i_n \cdot x_d''}{2u} = 2 \cdot \arcsin \frac{1.0,15}{2.1} = 8,6^\circ$$

=> Na odchylku fáze je alternátor mnohem citlivější, v protifázi překračuje hodnoty 3f zkratu cca 2x

Fázování alternátoru

Frekvence:



Rovnost brzdné a urychlující energie:

$$\frac{1}{2} J \Delta \Omega^2 = \int_{t_0}^{t_{\max}} P_e(t) \cdot dt =$$

$$\cong \int_{\vartheta_0}^{\pi} P_e(\vartheta) \cdot \frac{dt}{d\vartheta} d\vartheta \cong$$

$$\cong \int_{\vartheta_0}^{\pi} p_{\max} \cdot \sin \vartheta \cdot \frac{M_n \cdot \Omega_n}{\Omega_n} d\vartheta$$

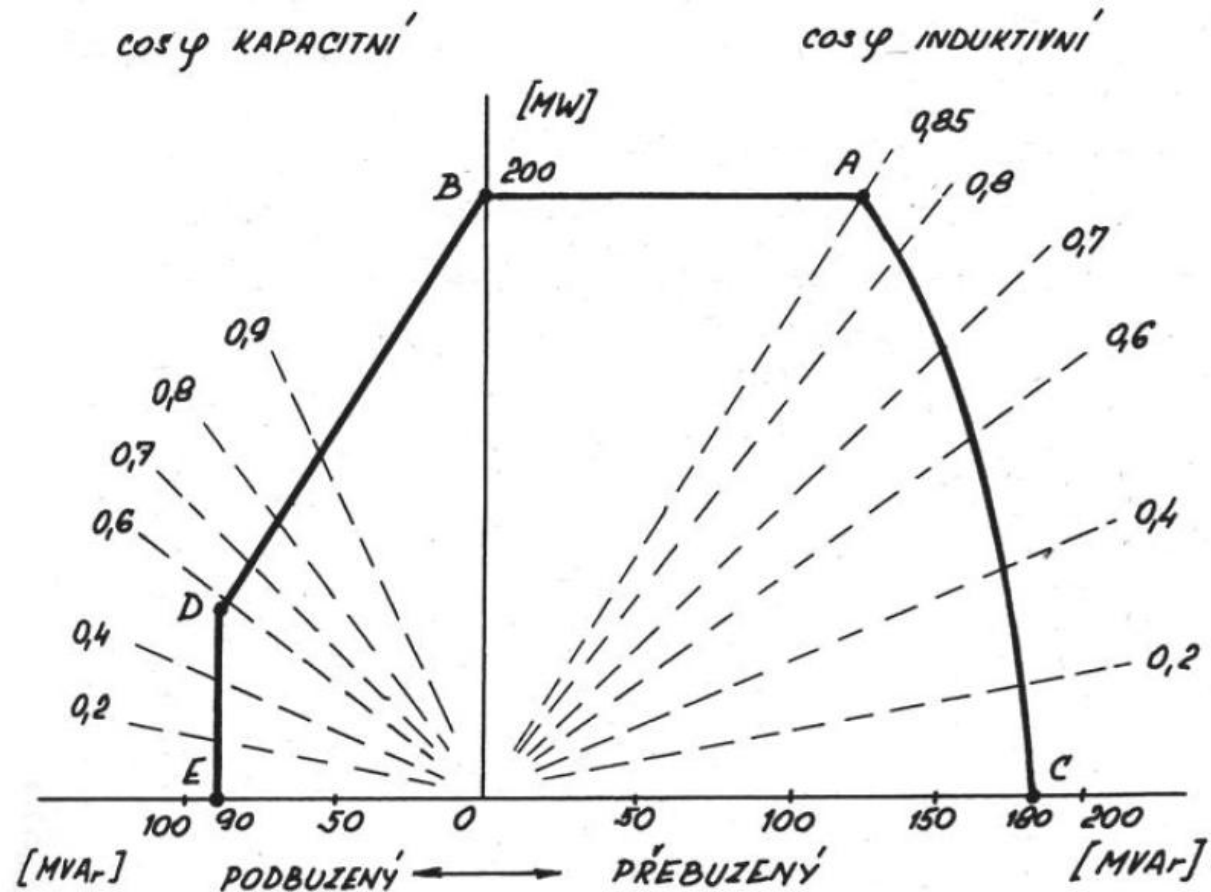
$$\frac{1}{2} \frac{J \cdot \Omega_n^2}{M_n} \Delta \omega^2 = \frac{1}{2} T_m \Delta \omega^2 = \int_{\vartheta_0}^{\pi} p_{\max} \cdot \sin \vartheta d\vartheta$$

a tedy

$$\Delta \omega_{\max} = \sqrt{\frac{2}{T_m} \int_{\vartheta_0}^{\pi} p_{\max} \cdot \sin \vartheta d\vartheta} = \sqrt{\frac{2}{T_m} p_{\max} \cdot (1 + \cos \vartheta_0)}$$

Pracovní oblast alternátoru

PQ diagram:



AB - Omezení výkonem turbíny
AC - Oteplení rotorového budícího
vinutí

BD - Oteplení čelních konstrukcí
DE - Omezení statickou stabilitou stroje