

10. Charakteristiky pohonů ve vlastní spotřebě elektrárny

Spotřebiče ve V.S. mají tyto charakteristické vlastnosti:

- Příkon
- Záběrný moment
- Doba trvání rozběhu

Hlavní okruhy spotřebičů klasické konvenční tepelné elektrárny jsou:

1. Zauhlování
Pásové dopravníky přímo z těžby (pokud není doprava železniční či lodní) plus ze složiště paliva a korečkové vykladače a nakladače. Vše vybaveno brzdovým zařízením při ztrátě napájení.
2. Pohony kotlů
Napájení vodou napáječkami, podpora hoření a zplyňování paliva vzduchovými ventilátory, podpora komínového tahu kouřovými ventilátory, odstraňování popílku elektrostatickými odlučovači. Čerpadla napáječek vybavená hydraulickou spojkou mají navíc olejová čerpadla a chladicí zařízení.
Doprava paliva podavači surového uhlí do mlýnů, odstraňování škváry vynašeči a drtiči strusky plus společně s popílkem její hydraulická doprava do jímek a na složiště. Čerpání topných olejů pro najíždění bloku do provozních nádrží a posléze do zateplovacích hořáků. Pohony v systému odsíření paliva.
3. Pohony ve strojně
Pohon olejových čerpadel a natáčení turbosoustrojí při najíždění a odstavování bloku (jinak zajištěno mechanickými čerpadly), - zvedací čerpadla a natáčeč pohony pro rovnoměrné ohřátí soustrojí.
Pohony armatur, chladicí čerpadla hlavního okruhu, chlazení oleje, chlazení alternátoru, kondenzátní čerpadla, čerpání surové vody v úpravě chladicí a napájecí vody.
4. Další spotřebiče
Měřicí, řídicí, zabezpečovací a informační technika, výtahy, jeřáby, osvětlení.

Hlavní okruhy spotřebičů jaderné elektrárny jsou obdobné, jako u konvenčních elektráren, s tím, že je obvykle kladen vyšší nárok na spolehlivost. Vyšší nároky na výkon při stejném blokovém výkonu vyplývají také z horších parametrů páry u JE. Kromě toho jsou zde navíc tyto hlavní spotřebiče:

Hlavní oběhová čerpadla zajišťující cirkulaci chladiva tlakovodních reaktorů

- Bezucpávková čerpadla (hydraulická a pohonná část v jednom celku s malou setrvačností a malé výpadky napájení V.S. tedy nutno zabezpečit setrvačností hlavního turbosoustrojí)
- Ucpávková čerpadla (mají setrvačník na hřídeli rotoru zvyšující bezpečnost, kromě toho jsou účinnější, pohon je mimo kontakt s chladivem a lze tedy snáze provádět revize či záměny)
- Odstředivá čerpadla u JE chlazených tekutým kovem

Turbokompresory v hlavním okruhu u JE s plyným chladivem poháněné synchronními el. Strojemi.

Elektroohříváče kompenzátoru objemu pro udržení stálého tlaku chladiva a zamezení případného varu. Poměrně velký spotřebič (VVER 440 při spouštění cca 1.5 MW). U JE chlazených kovem je ohřev všude tam, kde potencionálně možné tuhnutí média.

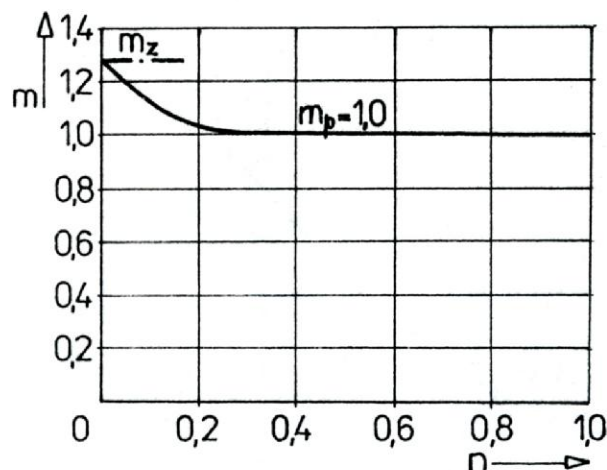
Zařízení systému ochrany, dopravních systémů a systémů řízení reaktoru pro kontrolu jaderných a tepelných parametrů (regulační a havarijní tyče), měření radioaktivity,

neutronového toku, otravy reaktoru, přeprava vyhořelého paliva, kontrola těsnosti palivových článků, ventilační systémy s vysokým výkonem atd.

Momentové charakteristiky pohonů V.S.

Momentové charakteristiky pohonů se stálým momentem

Charakteristika je platná pro zařízení o malých rychlostech, kde odpor vzduchu je zanedbatelných a uvažuje se pouze mechanické tření. Toto platí pro vodorovné dopravníky, podavače, rošty, zubová a pístová čerpadla, kompresory apod. Malé zvýšení momentu zátěže je pouze při rozběhu zařízení z klidu.



- m_p - jmenovitý moment zátěže
- $m_z \sim 1.3 m_p$ - moment zátěže při rozběhu (při spouštění za odlehčení je $m_z \sim (0.2 \text{ až } 0.5) m_p$)

Momentové charakteristiky pohonů s proměnným momentem

Toto platí pro zařízení s relativně vyššími otáčkami jako jsou běžná čerpadla, ventilátory, turbokompresory. Vlastnosti těchto pohonů se mění podle otáček a dodávaného množství média:

Množství média:

$$Q_2 = \frac{n_2}{n_1} Q_1$$

Tlak média:

$$p_2 = \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 p_1$$

Příkon pohonu:

$$P_2 = \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^3 P_1$$

Moment zátěže:

$$M_2 = \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^a M_1$$

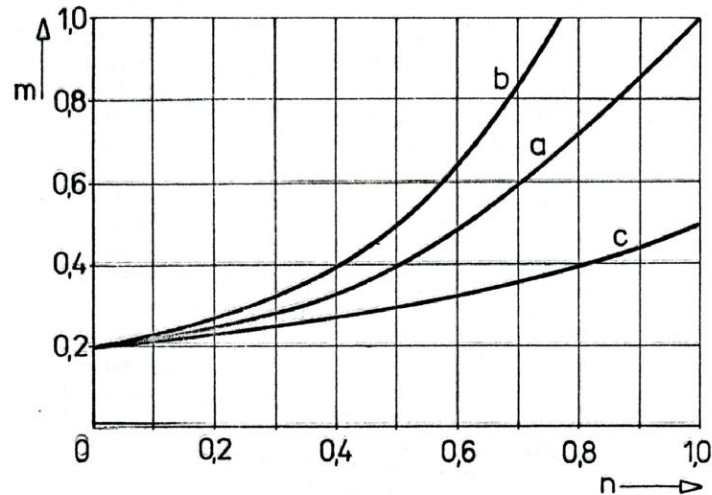
Potom momentová charakteristika zátěže pohonů lze vyjádřit v poměrných jednotkách:

$$m_p = m_{p0} + (m_{p1} - m_{p0}) \left(\frac{n}{n_s} \right)^a \quad m_{p0} = \frac{M_{p0}}{M_N} \sim 0.1 \text{ až } 0.2$$

$$m_{P1} = \frac{M_{P1}}{M_N}$$

M_{P1} - moment při synchronních otáčkách n_s

- a* - součinitel závislý na charakteru zařízení, otevření armatur (ventilátory hodnota 2, u čerpadel s větším statickým protitlakem hodnota stoupá přes 2)



- a* - normální zatížení pohonu
b - axiální ventilátor nebo čerpadlo při přivřených či uzavřených armaturách
c - radiální ventilátor nebo čerpadlo při přivřených či uzavřených armaturách

Volba elektromotorů pro pohony zařízení

Pro pohony ve V.S. elektrárny je třeba uvažovat tyto specifické požadavky na provoz, určené snahou o optimální spolehlivost a hospodárnost investiční a údržbovou v náročném prostředí daném vysokou prašností, popř. teplotou:

- Dostatečný výkon při nasazení jmenovitém i přechodných stavech (naopak předimenzování by neúměrně zhoršovalo účinnost)
- Momentová charakteristika umožňující plynulý rozběh
- Schopnost provádět i tři děletrvající těžké rozběhy při studeném stavu okolo 40°C
- Schopnost dvojnásobného zapnutí zahřátého motoru okolo 120°C
- Obecně vysoká spolehlivost i při častých rozbězích (150 až 450 krát do roka)
- Záběrový proud nepřekračující 5.5 násobek jmenovitého
- Možnost setrvání ve stavu nakrátko pro dvoupólové a čtyřpólové stroje 5 sec., pro šestipólové 10 sec.
- Schopnost pracovat i při sníženém napětí 0.7 U_N a jmenovité zátěži nejméně 15 minut
- Bezporuchový provoz nejméně po dobu 3 let (cca 15000 provozních hodin)
- Schopnost najíždět i při nesouhlasu fází odeznívajícího a nového napájení při samočinném zapínání
- Maximální moment motoru je nejméně dvojnásobek jmenovitého M_N
- Hlučnost pod 85 dB

Těmto náročným kritériím v zásadě vyhovují pouze asynchronní pohony s kotvou nakrátko. Stejnosemné stroje a střídavé komutátorové stroje mají lepší schopnost regulace otáček ale nevyhovují svou spolehlivostí. Pro vysoké výkony turbokompresorů v JE (~ 5MW) jsou pro svou vyšší účinnost a lepší účinník využívány synchronní motory.

Volba hlavních parametrů elektromotorů

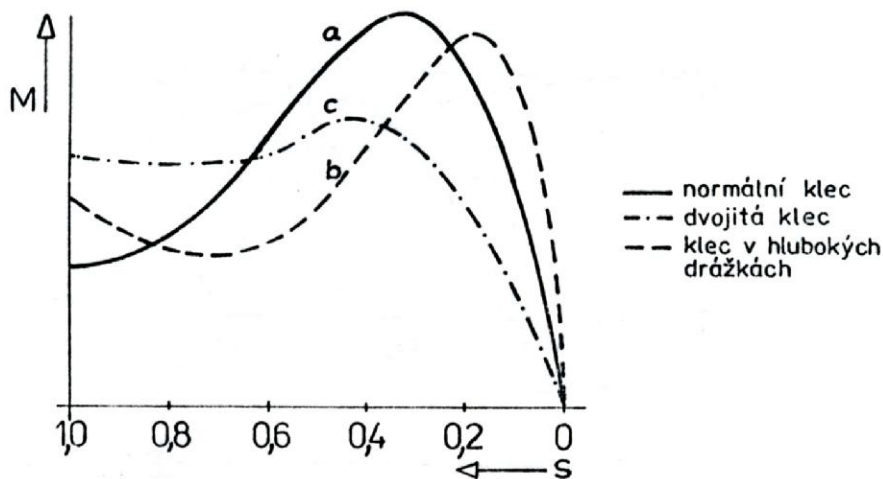
Napětí elektromotoru

Pro pohony do 250 kW se používá 380 (400) V, výjimečně 500 V u výkonů do 350 kW. Napětí 6 kV pro pohony nad 300 kW (pro vícepólové stroje od 200 kW). Kromě provozních ztrát je volba napětí dána i problémy s vysokým přepětím při vypínání malých induktivních proudů motorů malých výkonů na 6 kV.

Výkon elektromotoru

Výkon se volí 1.1 až 1.15 krát příkon poháněného zařízení se zohledněním všech výše uvedených požadavků, zejména pak plynulosti a doby rozběhu. Aktuálně jsou k dispozici vzduchem chlazené asynchronní pohony do 10 MW. Pro vyšší výkony je nutno použít vodní chlazení. V klasických tepelných elektrárnách je největší pohon (napáječka) u 200 MW bloku 4 MW a u 500MW bloku 8.6 MW.

Momentová charakteristika elektromotoru



Pro rozběh zařízení je podstatný rozdíl momentu vůči charakteristice zátěže: tzv. dynamický moment $\Delta M = M_M - M_P$.

Pro plynulý rozběh je pak potřebné, aby: $\Delta M > 0.2M_N$

Toto musí být splněno i při snížení napájecího napětí:

$$u_Z = \frac{U_N - \Delta U_{MAX}}{U_N} \quad - \quad \text{napětí na svorkách pohonu při rozběhu}$$

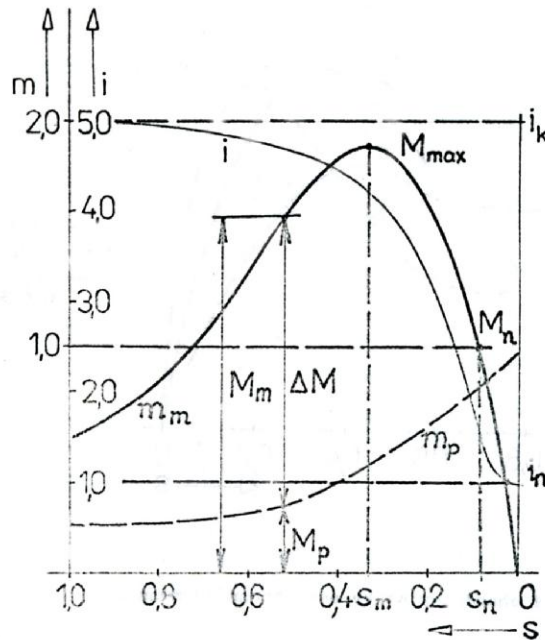
z klidu ($s = 1$)

$$M_Z u_Z^2 - M_{P0} \geq 0.2M_N$$

M_Z - Záběrový moment motoru v klidu ($s = 1$)

M_{P0} - Moment zátěže motoru v klidu ($s = 1$)

$$m_Z = \frac{M_Z}{M_N} \quad - \quad \text{Poměrná hodnota záběrového momentu motoru v klidu ($s = 1$)}$$



$$M_N \left(\frac{M_Z}{M_N} u_Z^2 - 0.2 \right) \geq M_{P0}$$

$$M_N \geq \frac{1}{m_Z \cdot u_Z^2 - 0.2} M_{P0}$$

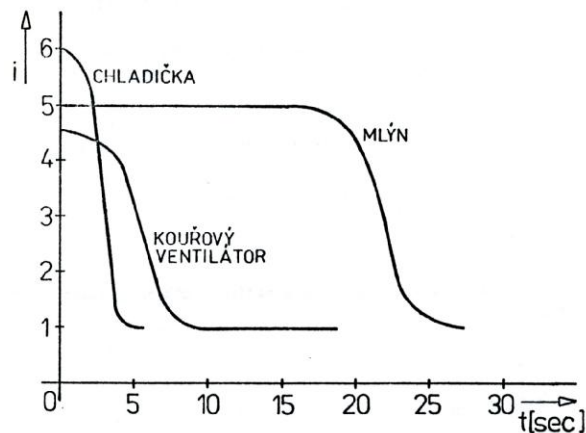
$$M_N = \frac{P_N}{w_N}$$

Splnění podmínek lze tedy dosáhnout buď volbou charakteristiky s dostatečným záběrným momentem m_Z (správná – ekonomičtější možnost), nebo větším jmenovitým výkonem P_N .

Doba rozběhu pohonu

Doba rozběhu je dána momentovou charakteristikou pohonu i zátěže.

Mlýny paliva	30 až 35 sec.
Kouřové ventilátory	7 až 10 sec.
Napáječky	6 až 8 sec.
Vzduchové ventilátory	3 až 4 sec.
Další menší pohony	2 až 3 sec.



Praktická omezení doby rozběhu jsou dána oteplením motoru a poklesem napětí. V případě nepřesvědčivých výsledků relace momentů na počátku rozběhu je nutno vyšetřit celý průběh rozběhu v čase:

$$\Delta M = J \frac{d\Omega_M}{dt} \quad [N \cdot m; kg \cdot m^2; rad / sec; sec]$$

Zavedeme-li poměrnou úhlovou rychlost a otáčky:

$$w_M = \frac{\Omega_M}{\Omega_{SM}} = \frac{n_M}{n_{SM}} = n \quad \text{potom:}$$

$$\frac{d\Omega_M}{dt} = \Omega_{SM} \frac{dw_M}{dt} = \Omega_{SM} \frac{dn}{dt} \quad \text{a} \quad \Delta M = J \cdot w_S \frac{dn}{dt}$$

Doba rozběhu je potom po integraci:

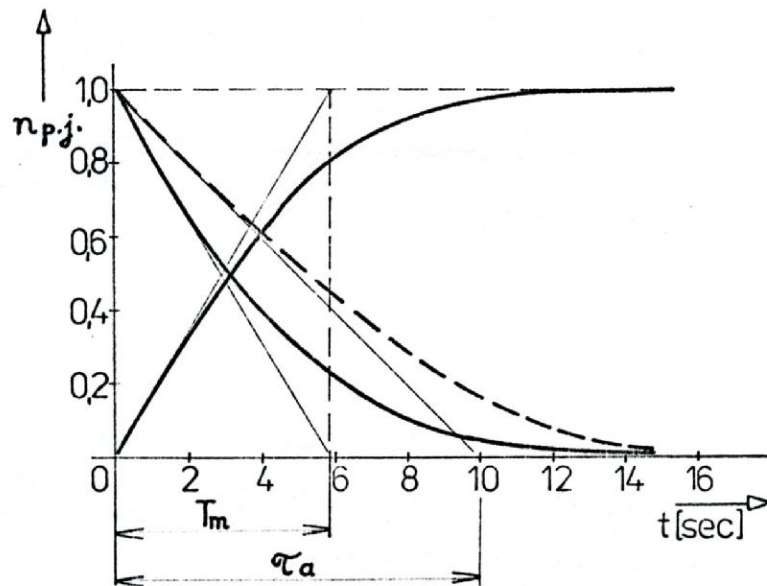
$$t = \int_{n_1}^{n_2} \frac{J \cdot w_S}{\Delta M} dn = T_M \int_{n_1}^{n_2} \frac{dn}{\Delta m} \quad \text{kde } T_M = \frac{J \cdot \Omega_{SM}}{M_N} = \frac{J \cdot \Omega_{SM}}{\frac{P_N}{\Omega_{SM}}} = \frac{J \cdot \Omega_{SM}^2}{P_N}$$

Pokud místo momentu setrvačnosti J udáván setrvačný moment GD^2 , kde:

$$J = \frac{GD^2}{4g} \quad [kg \cdot m^2; N \cdot m^2; m / s^2]$$

Není-li známo ani jedno z: J , GD^2 , T_M lze odvodit T_M z doběhové charakteristiky soustrojí:

$$t = T_M \int_{n_N}^0 \frac{dn}{-1} = T_M$$



V případě, že pře doběhem nepracovalo soustrojí s jmenovitým výkonem, je třeba T_M přepočítat:

$$T_M = t_A \frac{M_P}{M_N} = t_A \frac{P_P}{P_N} h_P, \quad \text{kde } M_P, P_P, h_P \text{ jsou parametry při vypnutí soustrojí.}$$

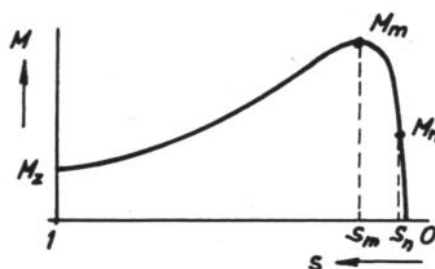
Není-li k dispozici momentová křivka motoru, lze ji získat ze tří charakteristických hodnot: záběrového momentu M_Z pro $s_Z = 1$, jmenovitého momentu M_N pro $s_N = \frac{n_S - n_N}{n_S}$ a momentu zvratu (momentové přetížitelnosti) M_{MAX} pro s_{MAX} .

Z Klossova vztahu pro poměrný moment asynchronního motoru:

$$m = \frac{2 \cdot m_{MAX}}{\frac{s}{s_{MAX}} + \frac{s_{MAX}}{s}}$$

pro jmenovité hodnoty $m = m_N = 1$ a $s = s_N$ je:

$$1 = \frac{2 \cdot m_{MAX}}{\frac{s_N}{s_{MAX}} + \frac{s_{MAX}}{s_N}}$$



tedy: $\frac{s_N^2 + s_{MAX}^2}{s_{MAX} \cdot s_N} = 2 \cdot m_{MAX}$ $s_{MAX}^2 - 2 \cdot s_N \cdot m_{MAX} \cdot s_{MAX} + s_N^2 = 0$

$$s_{MAX} = s_N \left(m_{MAX} + \sqrt{m_{MAX}^2 - 1} \right)$$

Získané tři body doplníme bodem $M_0 = 0$ pro $s = 0$ a proložíme křivkou.

Kontrola na oteplení motoru při rozběhu

Kontrola se provádí u soustrojí s dlouhým rozběhem. Z běžných vztahů pro oteplení asynchronních motorů:

$$I^2 \cdot R \cdot dt = m \cdot c \cdot dJ + m \cdot S \cdot (J - J_E) dt \quad \text{kde:}$$

- R - činný odpor vodiče vinutí
- m - hmotnost vodiče vinutí
- c - měrná tepelná kapacita vodiče vinutí
- J - teplota vodiče vinutí
- m - ochlazovací konstanta
- S - ochlazovací plocha
- J_E - vnější teplota (teplota okolí)

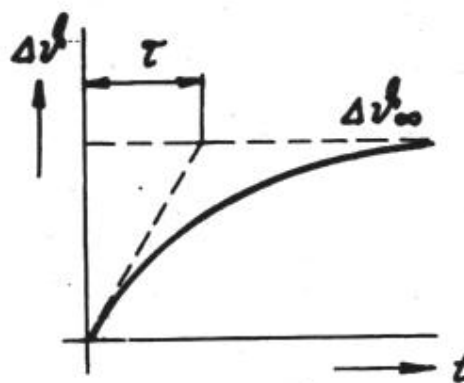
$$J - J_E = \frac{R \cdot I^2}{m \cdot S} \left(1 - e^{-\frac{m \cdot S}{m \cdot c} t} \right)$$

$$t = \frac{m \cdot c}{m \cdot S} \quad \Delta J_\infty = \frac{R \cdot I^2}{m \cdot S}$$

$$\Delta J = J_\infty \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

Vydělíme rovnicí výrazem:

$$\Delta J_N = \frac{R \cdot I_N^2}{m \cdot S}$$



$$\frac{\Delta J}{\Delta J_N} = \frac{I^2}{I_N^2} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) = i^2 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

Pokud pro rozběh zanedbáme ochlazování motoru ($m \cdot S \cdot (J - J_E) dt \rightarrow 0$):

$I^2 \cdot R \cdot dt = m \cdot c \cdot dJ$ je řešením tečna původní oteplovací charakteristiky:

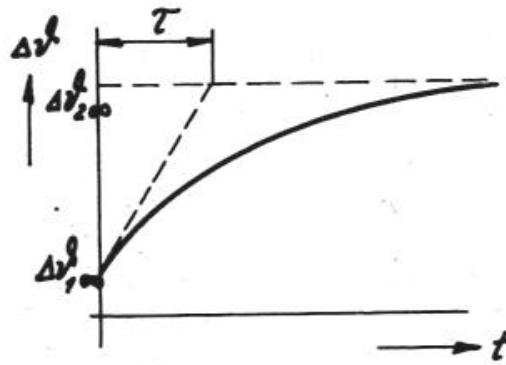
$$\Delta J = \frac{R \cdot I^2}{m \cdot c} t = \frac{R \cdot I^2}{m \cdot S} \cdot \frac{m \cdot S}{m \cdot c} t = \frac{\Delta J_\infty}{t} t \quad \text{a} \quad \frac{\Delta J}{\Delta J_N} = \frac{I^2}{I_N^2} \cdot \frac{t}{t} = \frac{i^2}{t}$$

Pro výpočet oteplení při náhlých změnách proudu tedy platí:

$$\frac{\Delta J}{\Delta J_N} = i_1^2 + (i_2^2 - i_1^2) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

resp.:

$$\frac{\Delta J}{\Delta J_N} = i_1^2 + \frac{i_2^2 - i_1^2}{\tau} t$$



Například změnu ze studeného stavu:

$$\Delta J_{1\infty} = 0 \quad a \quad i_1 = 0$$

Při rozběhu z teplého stavu:

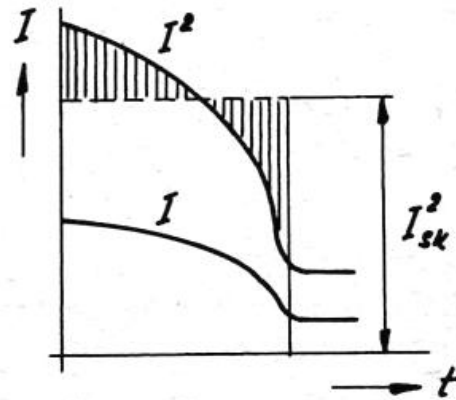
$$\Delta J_{1\infty} = \Delta J_N \quad a \quad i_1 = 1$$

Při předběžném 80% oteplení:

$$\Delta J_{1\infty} = 0.8 \cdot \Delta J_N \quad i_1^2 = \frac{\Delta J_{1\infty}}{\Delta J_N}$$

$$i_1 = \sqrt{0.8} \approx 0.9$$

Proud i_2 je konstantní ekvivalentní oteplovací proud, většinou stačí uvažovat 93% záběrového proudu.



Protože: $\Delta J = \frac{R \cdot I^2}{m \cdot c} t$, je pro jmenovité podmínky: $\Delta J_N = \frac{R \cdot I_N^2}{m \cdot c} t$ a odtud je

oteplovací časová konstanta:

$$t = \frac{m \cdot c}{R \cdot I_N^2} \Delta J_N = \frac{g \cdot q \cdot l \cdot c}{k_V \cdot r \cdot \frac{l}{q} (j_N \cdot q)^2} \Delta J_N = \frac{g \cdot c}{k_V \cdot r} \cdot \frac{\Delta J_N}{j_N^2}$$

- m - hmotnost vodiče vinutí
- c - měrná tepelná kapacita vodiče vinutí (pro Cu, 75°C je 390 J/kg·K)
- g - hustota vodiče vinutí (pro Cu, 75°C je 8900 kg/m³)
- q - průřez vodiče vinutí
- l - délka vodiče vinutí
- k_V - činitel vinutí
- r - měrný odpor vodiče vinutí (pro Cu, 75°C je 21.5·10⁻⁹ Ω·m)
- j_N - jmenovitá hustota proudu ve vinutí
- ΔJ_N - jmenovité oteplení vodiče vinutí

Pro $\Delta J_N = 40$, $j_N = 2 \cdot 10^6$ A/m² a $k_V = 1.05$ bude například:

$$t = \frac{150 \cdot 10^{12}}{j_N^2} \Delta J_N = \frac{150 \cdot 10^{12}}{4 \cdot 10^{12}} 40 \text{sec} = 150 \text{sec}$$

Kritické napětí při samonajždění elektromotorů

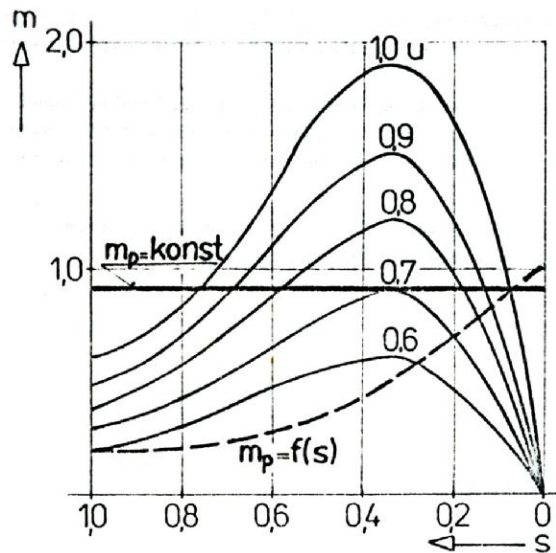
Při krátkodobých ztrátách a přerušeních napájení V.S. v důsledku zkratů dochází k poklesu velikosti napětí podle blízkosti a tvrdosti poruchy. Při poklesu napětí dojde k snížení otáček (zvětšení skluzu) a nárůstu proudu nepřímo úměrně napětí. Pokud se křivka momentu motoru dostane zcela pod úroveň závislosti momentu zátěže dochází k intenzivnímu brzdění a případnému zastavení pohonu. Hraniční situace je pro tzv. kritické napětí:

$$M_{MAX}' = M_{MAX} \left(\frac{U_{KRIT}}{U_N} \right)^2 = M_P \quad m_{MAX}' = m_{MAX} \cdot u_{KRIT}^2 = m_P$$

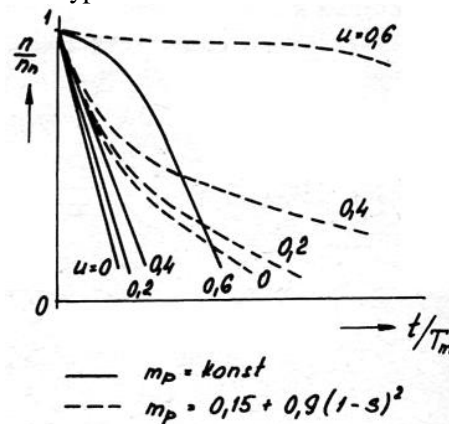
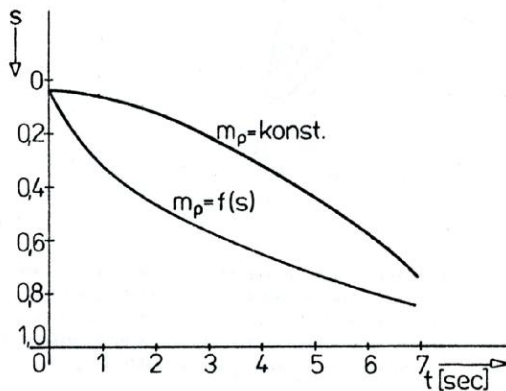
Protože pro vhodné asynchronní pohony je $m_{MAX} \approx 1.8 \div 2.5$ a pokud je m_P přibližně odpovídající jmenovitému výkonu, čili $m_P = 1$, je potom:

$$u_{KRIT} = \frac{1}{\sqrt{m_{MAX}}} = 0.75 \div 0.63$$

Tento vztah lze použít i pro jinou než konstantní zátěž, pokud se skluz příliš nezmění. Závislost momentu motoru na napětí:



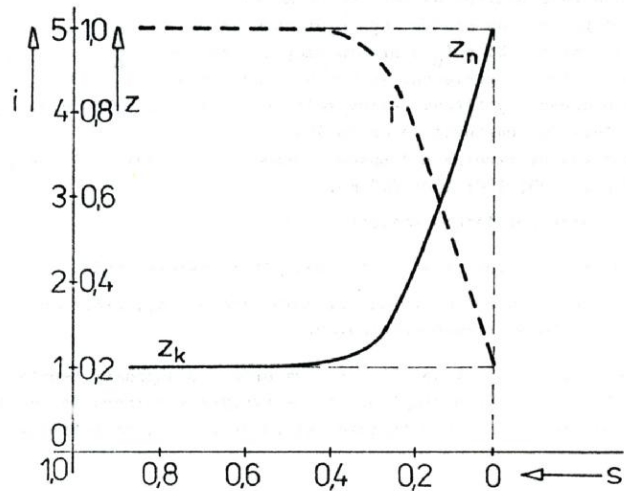
Doběhové charakteristiky podle typu zátěže motoru:



Pro jistý poměrný pokles napětí je nejprve pokles otáček nezávislý na zátěži. Pro hluboké poklesy napětí jsou doběhové charakteristiky podobné jako při úplné ztrátě napájení. Pro kontroly řešíme tedy jen úplné výpadky.

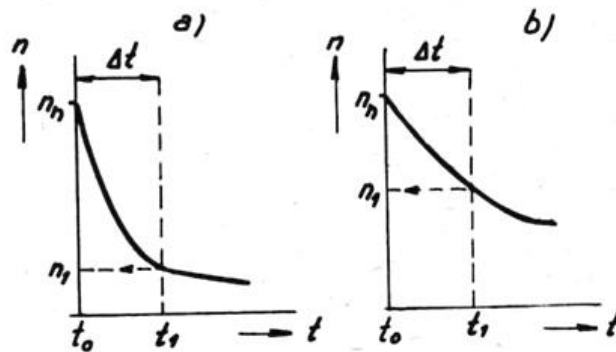
I po obnovení napájení je pokles napětí stále trvající v důsledku navýšení proudů při zvětšeném skluzu pohonů:

Při poměrně krátké ztrátě napájení budou proudy pohonů blízké záběrovým.

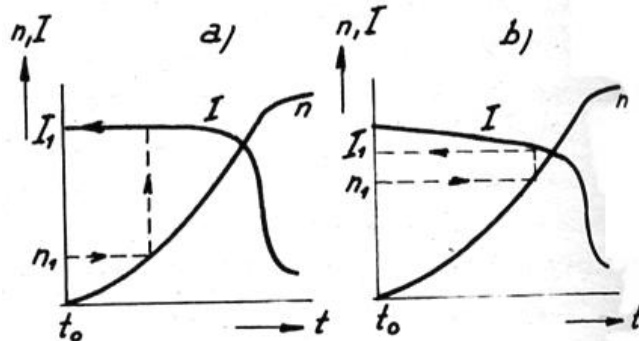


Nejpřesnější výpočet pro samonajždění dvou pohonů:

1. Stanovení poklesu otáček pohonů pro známou dobu přerušení napájení Δt podle naměřených doběhových křivek nebo z momentových charakteristik a získáme otáčky n_1 pro oba pohony.



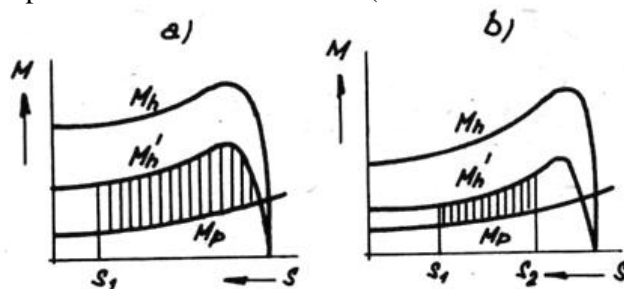
2. Určení proudů motorů I_1 pro snížené otáčky n_1 ze závislostí rozběhových charakteristik, ale při jmenovitém napájení:



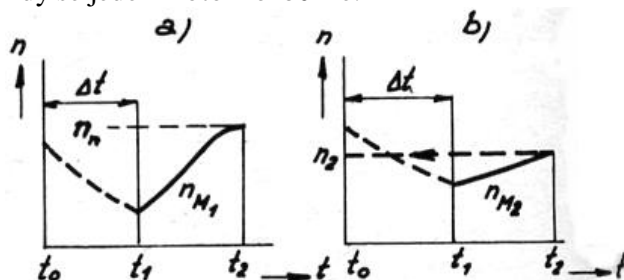
3. Součtovému proudu odpovídá výsledná reaktance motorů, tedy skutečný odebíraný proud a skutečné napětí pohonů je:

$$x_C = \frac{1}{\sum i_1} \quad i_C = \frac{u_E}{x_T + x_C} \quad u_P = \frac{u_E}{x_T + x_C} x_C$$

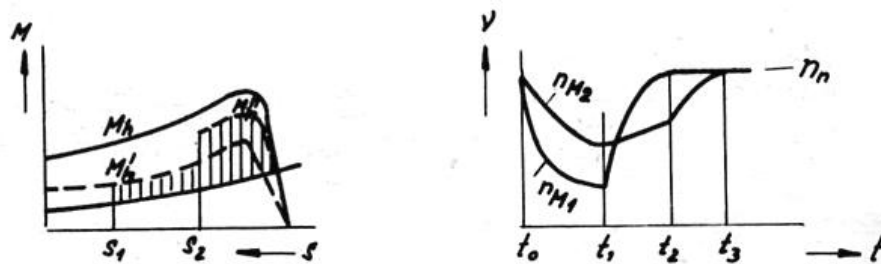
4. Redukujeme výkonové charakteristiky $M_H' = M_H \cdot u_1^2$ a dále předpokládáme napětí na motorech konstantní (ve skutečnosti se konsoliduje):



5. Podle $t = \int_{n_1}^{n_2} \frac{J \cdot \omega_s}{\Delta M} dn = T_M \int_{n_1}^{n_2} \frac{dn}{\Delta m}$ určíme rozběhové charakteristiky až do doby, kdy se jeden motor rozběhne:



6. Upravíme velikosti otáček upravíme velikosti proudů, napětí a momentů dle bodů 2. 3. a 4. pro zbývající motor a dopočteme rozběh:



7. Pokud rozběh některého pohonu bude příliš dlouhý, je třeba zkontrolovat jeho oteplení.

V případě většího počtu motorů řadíme stroje se stejnými parametry do skupin a uvažujeme je sumárně.

Pro orientační výpočty stačí ověřit velikost poklesu napětí při samonajíždění a možnost rozběhu pohonu, popř. počítat s úplným zastavením pohonů a se záběrnými proudy (pro jistotu horší případ, tak jak bylo uvedeno dříve). Nebo dokonce záběrný proud počítat jako stejný (nejlépe pro jistotu ten největší):

$$\Delta u_T = \frac{u_E}{x_T + x_Z} \cdot x_T < 35 \% \quad S_{CM} \leq S_T \frac{\Delta u_T}{u_E - \Delta u_T} \cdot \frac{1}{i_{CK} \cdot x_T}$$

Pohony, které se nevejdou do S_{CM} jsou pak spouštěny se zpožděním cca 0.5 sec.

Příklady praktických parametrů rozběhů pohonů ve V.S. bloku 200 MW:

Pohon	Jmenovité provozní hodnoty				Hodnoty při rozběhu				
	P_N [kW]	U_N [kV]	I_N [A]	n_N [ot./min]	U [kV]	I [A]	t [sec]	I_{ZN} [A]	k []
Kouřový ventilátor	1000	6	116	494	5.8	585	6.3	605	5.21
Vzduchový ventilátor	1000	6	123	741	5.8	530	5.5	548	4.45
Mlýn	700	6	83.2	1480	5.85	330	41.5	338	4.06
Chladicí čerp.	2000	6	245	423	5.7	1018	1.5	1070	4.37
Elektronapajčka	4250	6	490	2980	5.6	2500	3.1	2680	5.47

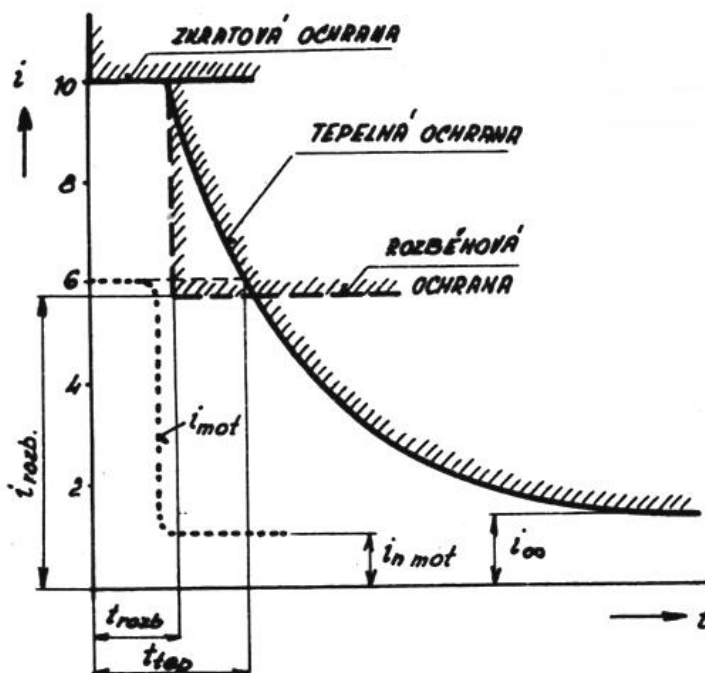
Chránění asynchronních pohonů

Model chránícího algoritmu vychází z oteplovacího průběhu motoru (charakteristika časově závislá) doplněné rychlým členem pro vypínání zkratových proudů (charakteristika časově nezávislá), u pohonů nad 2MW navíc ještě rozdílová ochrana pro zabezpečení vnitřních poruch. Speciálně pohony s velkou setrvačností mají zpětnou wattovou ochranu.

Další ochrany mohou být na nesymetrii napájecího napětí, teplotu ložisek, vibrace soustrojí apod.

Menší stroje jsou chráněny pouze jističi nebo stykači s elektrotepelným bimetalickým relé.

U pohonů s dlouhým rozběhem je nutno proudovou informaci kombinovat s teplotní, neboť rozběh překračuje omezení běžného přetížení teplého stroje:



Základní ochrana typu ALOX zabezpečuje reakci ve dvou stupních ($1.05 I_N$ a $1.1 I_N$) s časovým nastavením $t_1 = 1 \div 15 \text{ min}$ $t_2 = 10 \div 150 \text{ min}$ doplněných rozběhovým omezujícím článkem ($0.75 I_N$ až $5.4 I_N$) s časovým nastavením $t_Z = 6 \div 30 \text{ sec}$ a zkratovým článkem ($4.5 I_N$ až $12 I_N$) s časovým nastavením t_K 50, 100, 150, 200 ms. Tepelný model aproximuje závislost:

$$\frac{\Delta J}{\Delta J_N} = \left(\frac{I}{I_N} \right)^2 \left[1 - p \cdot e^{-\frac{t}{t_1}} - (1-p)e^{-\frac{t}{t_2}} \right]$$