

# **1 DIMENZOVÁNÍ A NÁVRH POHONŮ S ASYNCHRONNÍMI MOTORY.**

## **1.1 Úvod**

Při návrhu pohonu je třeba si uvědomit:

1. Pohon vždy dodává takový výkon jaký pracovní mechanismus spotřebuje. Vždy platí zákon zachování energie – tj. musí platit rovnováha mezi dodávaným a odebíraným výkonem vyjádřená pohybovou rovnicí.
2. Asynchronní motor lze krátkodobě přetěžovat až do momentu zvratu. Přetěžování asynchronního motoru napájeného z frekvenčního měniče je omezené krátkodobou proudovou přetížitelností frekvenčního měniče, která bývá 10 resp. 50 % po dobu 60 sec. Při požadavku na větší resp. delší proudovou přetížitelnost je třeba zvolit adekvátně větší frekvenční měnič.

## **1.2 Dimenzování a návrh pohonu**

Dimenzování a návrh pohonu vychází:

1. Z charakteristiky napájecí sítě v místě připojení tj. z napětí, kmitočtu, případně zkratového výkonu.
2. Z požadavků na pohon s ohledem na zátěž a technologický proces tj.z:
  - požadovaného výkonu na hřídeli elektromotoru při daných otáčkách,
  - momentové charakteristiky zátěže v závislosti na otáčkách (tzv. průběhu protimomentu),
  - momentů setrvačnosti zátěže a zvoleného elektromotoru,
  - u regulovaných pohonů z regulačního rozsahu,
  - z požadavků na dynamiku a přetížitelnost pohonu.

Dimenzování a návrh pohonu se provádí po krocích:

1. Návrh komponent pohonu podle výkonových a momentových parametrů zátěže.
2. Kontrola komponent pohonu podle vlastností zátěže a ostatních požadavků na pohon.

## **1.3 Základní výrazy**

**Výkon**

$$P = M \cdot \omega \quad [W; Nm, s^{-1}]$$

**Otáčky**

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} \quad [s^{-1}; \text{min}^{-1}]$$

**Výkon**

$$P = \frac{M \cdot n}{9550} \quad [kW; Nm, \text{min}^{-1}]$$

## 1.4 Pohybová rovnice

Nezastupitelné místo při návrhu pohonu má pohybová rovnice, která slouží ke kontrole:

- doby rozběhu u neregulovaných pohonů
- dynamických dějů (zpomalování, urychlování) u regulovaných pohonů.

Pohybová rovnice vychází ze známého d'Alambertova principu „těleso rotující kolem své stálé osy je v dynamické rovnováze, je-li součet všech aktivních a pasivních momentů roven nule“.

$$M_H - M_Z = M_{DYN}$$

Pro rozdíl mezi hnacím a zátěžným momentem se používá označení akcelerační (resp. urychlující) moment  $M_A$ .

Dynamický moment fyzikálně představuje moment, kterým se rotující těleso brání změně své úhlové rychlosti. Platí:

$$M_{DYN} = \frac{d}{dt}(J \times \omega)$$

$$M_{DYN} = J \cdot \frac{d\omega}{dt} + \frac{dJ}{d\varphi} \cdot \omega^2$$

Ve většině případů není moment setrvačnosti funkcí úhlu natočení a platí:

$$M_{DYN} = J \cdot \frac{d\omega}{dt}$$

Potřebný dynamický moment pro urychlení resp. zpomalení rotujícího tělesa o zadaný přírůstek otáček  $\Delta n$  v čase  $\Delta t$ :

$$M_{DYN} = J \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{\Delta n}{\Delta t}$$

Z pohybové rovnice vyplývá, že hnací moment pohonu  $M_H$  slouží k pokrytí momentu zátěže  $M_Z$  a v přechodových dějích dynamického momentu  $M_{DYN}$ . V ustáleném stavu při konstantních otáčkách je dynamický moment roven nule.

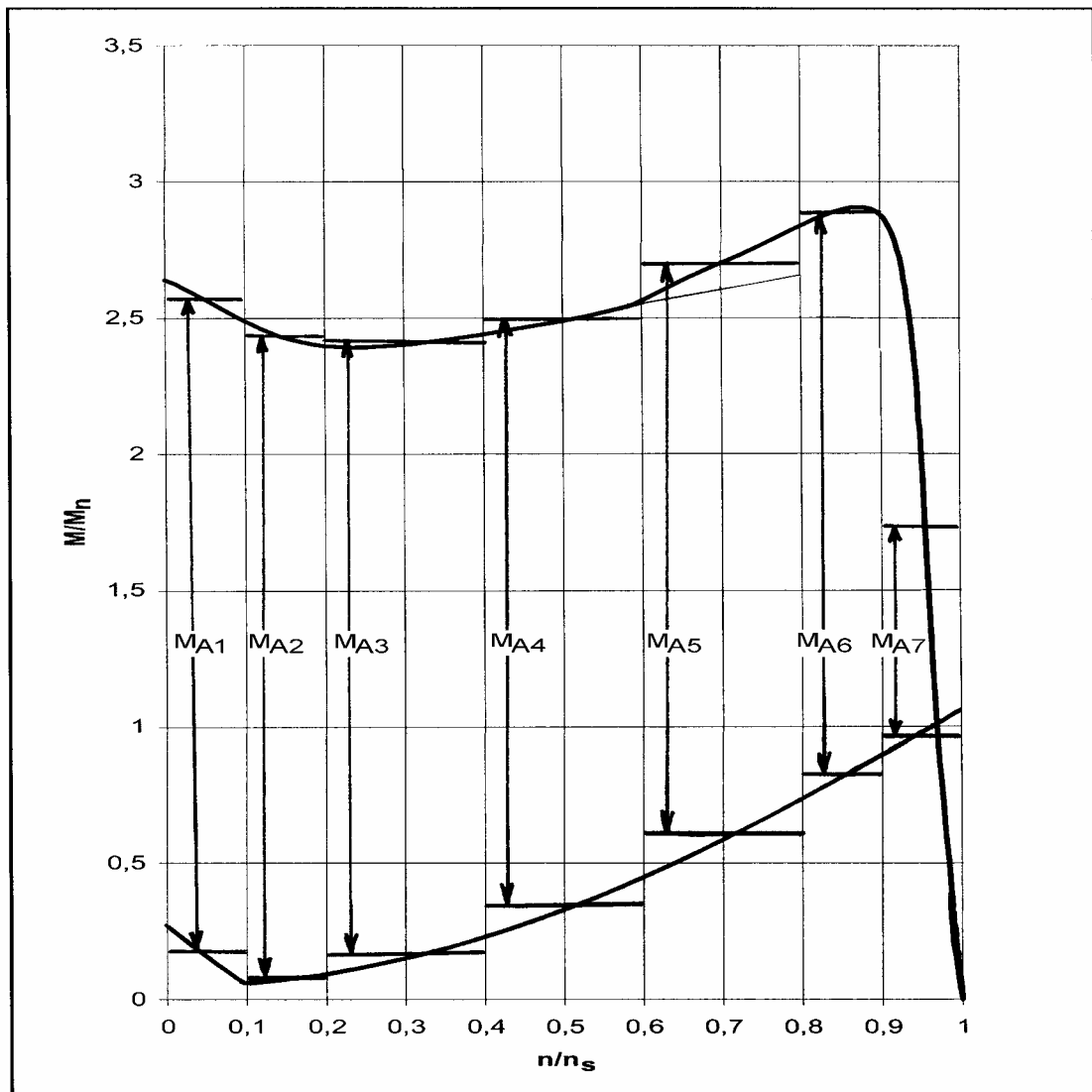
$$M_H = M_Z + M_{DYN}$$

Řešení pohybové rovnice se provádí metodou numerické nebo grafické integrace.

**Pozn.:** Všechny momenty setrvačnosti musí být přepočtené na stejnou rychlost otáčení!

$$J_{ZRED} = J_Z \left( \frac{n_Z}{n_M} \right)^2 \qquad M_{ZRED} = M_Z \left( \frac{n_Z}{n_M} \right)$$

## 1.5 Řešení pohybové rovnice metodou numerické integrace.



Obr. 1 Princip použití metody numerické integrace

Vycházíme ze zápisu pohybové rovnice v diferenčním tvaru.

$$(M_A)_i = (M_{DYN})_i$$

$$(M_H - M_Z)_i = J \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot \left( \frac{\Delta n}{\Delta t} \right)_i$$

Je-li v  $i$ -tém úseku akcelerační moment konstantní, pak platí:

$$(\Delta t)_i = J \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot \left( \frac{\Delta n}{M_H - M_Z} \right)_i$$

Akcelerační moment v i-tém úseku určíme jako:

$$(M_A)_i = \frac{1}{2} \cdot [(M_H - M_Z)_i + (M_H - M_Z)_{i+1}]$$

Celková doba přechodu od počáteční na konečnou rychlost je potom dána součtem časů  $\Delta t_i$  všech  $n$  úseků.

$$t_R = \sum_{i=1}^n (\Delta t)_i$$

Postup numerické integrace charakterizují tyto kroky:

- do společného grafu zakreslení momentové charakteristiky motoru a průběhu protimomentu
- rozdělení úseku mezi počáteční a konečnou rychlostí na  $n$  intervalů tj.  $n+1$  hodnot
- pro každé  $i$  odečet  $n_i$ ,  $M_{Hi}$ ,  $M_{Zi}$
- pro každý interval  $(\Delta n)_i = n_i - n_{i-1}$  výpočet  $M_{Ai}$
- výpočet  $\Delta t_i$  v každém intervalu
- výpočet doby rozběhu  $t_R$

## 1.6 Využití dynamického momentu ke zjednodušené kontrole rozběhu.

Při návrhu neregulovaného pohonu s asynchronním motorem, je po volbě motoru, prvním kontrolovaným parametrem délka rozběhu s ohledem na tepelnou kapacitu motoru při rozběhu. Během rozběhu je motor zatěžovaný ca. 6 násobkem jmenovitého proudu.

Při návrhu regulovaných pohonů je třeba sledovat dynamiku pohonu – tedy rychlost změny přechodu z výchozích otáček na zadané.

Jako aparát pro exaktní, přesné řešení obou úloh slouží pohybová rovnice. Ve všech případech ji však není nutné řešit, stačí provést kvalifikovaný odhad pomocí dynamického momentu.

Z pohybové rovnice vyplývá, že pro délku rozběhu jsou rozhodující dvě veličiny. Moment setrvačnosti celé soustavy a velikost akceleračního (urychlujícího) momentu.

Pokud do rovnice pro výpočet dynamického momentu:

$$M_{DYN} = J \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{\Delta n}{\Delta t}$$

dosadíme u neregulovaného pohonu za  $\Delta n$  jmenovité otáčky a za  $\Delta t$  maximální povolenou délku doby rozběhu, pak vypočtený  $M_{DYN}$  vyjadřuje minimální potřebnou velikost konstantního urychlujícího momentu během celého rozběhu, tak aby pohon jako celek docílil v čase  $t_R$  jmenovité otáčky.

Porovnání konstantního průběhu  $M_{DYN}$  se skutečným průběhem urychlujícího momentu - výsledkem grafického rozdílu momentové charakteristiky motoru a průběhu protimomentu zátěže, pak ukazuje nakolik je třeba přesně kontrolovat dobu rozběhu.

Stejný postup lze zvolit i při kontrole dynamiky regulovaného pohonu. Za  $\Delta n$  dosadíme rozdíl mezi počátečními a konečnými otáčkami, za  $\Delta t$  požadovanou dobu odezvy. Porovnání mezi urychlujícím a dynamickým momentem pak opět ukazuje, jak přesně je třeba kontrolovat dobu rozběhu.

Obecně platí, je-li mezi urychlujícím momentem a dynamickým výraznějším rozdíl ve prospěch urychlujícího momentu, není třeba dobu rozběhu dále přesněji počítat.

Stejný postup lze uplatnit i při doběhu a zpomalování chodu regulovaného pohonu. Zde si je však třeba uvědomit, že při takovém procesu pohon spotřebovává energii naakumulovanou v setrvačných hmotách pohonu. Má-li tedy dojít za stanovenou dobu  $\Delta t$  k zpomalení o  $\Delta n$  musí být během celé této doby  $M_{DYN}$  menší než moment zátěže. Není tedy problém použít tento postup při zpomalování a doběhu zařízení s konstantním průběhem zatěžovacího momentu. Velmi opatrně se však musí používat u zařízení s velkým momentem setrvačnosti a kvadratickým průběhem protimomentu – např. u velkých ventilátorů - zejména v oblasti nízké rychlosti otáčení.

## **2 DIMENZOVÁNÍ NEREGULOVANÝCH POHONŮ S ASYNCHRONNÍMI MOTORY.**

Výkon asynchronního motoru se volí podle požadované velikosti příkonu na hřídeli pracovního mechanismu. Vždy musí být udáno, zda tento příkon již obsahuje obvyklou výkonovou rezervu. Uvědomme si, že výkon na hřídeli motoru se rovná příkonu na hřídeli pracovního mechanismu.

### **2.1 Výkonová rezerva**

Podle technických zvyklostí se při stanovení výkonu motoru  $P_{MOT}$  zvyšuje vypočtený příkon na hřídeli pracovního mechanismu  $P_{MECH}$  o výkonovou rezervu  $10 \div 20 \%$ .

$$P_{MOT} = \frac{P_{MECH}}{0.8 \div 0.9}$$

K takto stanovenému výkonu motoru, se z typové řady motorů volí vždy motor s nejbližším vyšším výkonem.

Zvolený motor se potom kontroluje s ohledem na průběh zatěžovacího momentu a velikost momentu setrvačnosti, zda splňuje na něj kladené požadavky.

### **2.2 Service faktor SF**

Vyjádřuje trvalou možnou přetížitelnost motoru. Používá se u motorů v krytí IP23 podle standardu NEMA. Používá se hlavně v USA a anglicky mluvících zemích. SF 1.15 znamená, že je přípustné 15 % trvalé přetížení.

Norma NEMA připouští, že při takovém přetížení může být překročené dovolené oteplení odpovídající teplotní třídě izolace o 10 K. Při takovém provozu zároveň nesouhlasí štítkové údaje, připouští se, že se zkrátí doba životnosti vinutí a ložisek.

Podle NEMA se však SF vyžaduje zejména pro motory v IP23. Pro motory s krytím IP44 a vyšším norma povoluje SF = 1.

Původní smysl byl vyjádřit a definovat výkonové rezervy při návrhu motoru a pohonu. Z neznalosti, požadavek na určitou hodnotu SF, vede v různých výběrových řízeních ke kupení rezervy na rezervu.

V Evropě se v současné době používá jako základní provedení – provedení motorů v krytí IP54, u kterých norma NEMA povoluje SF = 1.

Většina výrobců má výkon u těchto motorů udaný pro SF = 1, výkon pro SF = 1,15 pak vede k redukci výkonu motoru o 15 %.

Pokud je pro motor definovaný SF, na štítku by měl být výkon definovaný ve tvaru např.:

12 kW : SF1.0 / 10 kW : SF1.2

**Pozn.:** Pozor nezaměňovat s výrazem „Power factor“ = účinnost ( $\cos\phi$ )

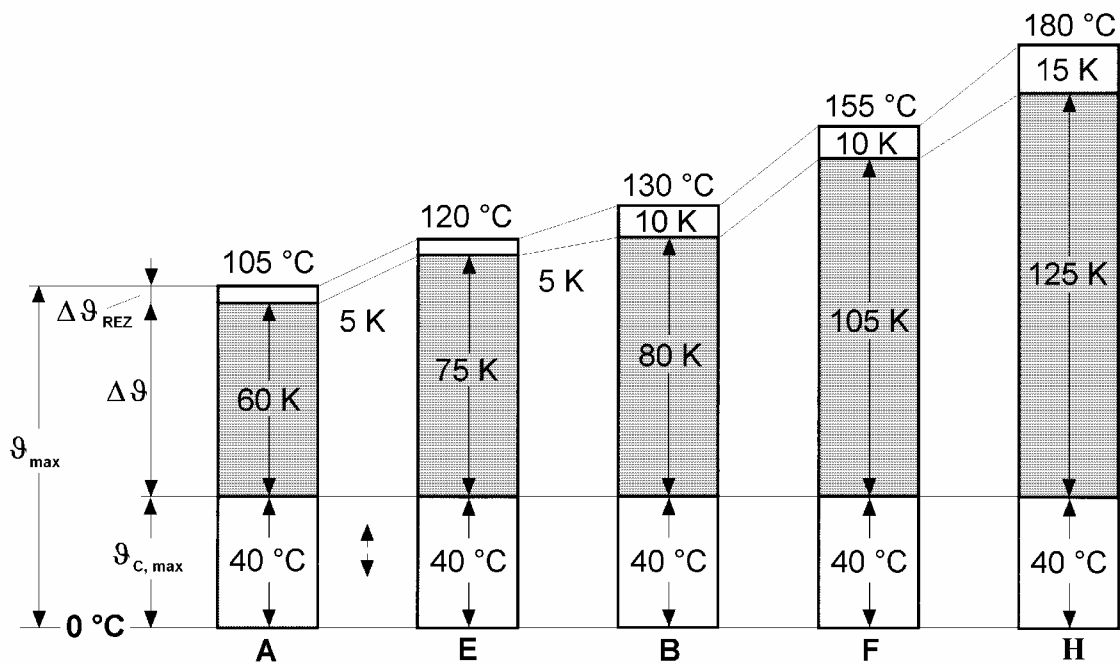
### **2.3 Izolační třída a tepelné využití motoru.**

Podle použitých izolačních materiálů se rozlišují různé třídy izolace spojené s maximálním dovoleným oteplením vinutí za chodu motoru, při maximální povolené teplotě okolí + 40 °C. Maximální teploty uvedené v Obr. 2 jsou udávány jako maximální hodnoty pro trvalý chod. Při krátkodobém oteplení např. na konci rozběhu leží hranice mezních teplot ještě více:

Třídy izolace:	<b>E</b>	<b>B</b>	<b>F</b>	<b>H</b>
Mezní teplota:	<b>175 °C</b>	<b>185 °C</b>	<b>210 °C</b>	<b>235 °C</b>

Bylo by logické, aby byl motor navržený tak, aby při zatížení jmenovitým výkonem měl oteplení na úrovni maximálního dovoleného oteplení. Trend návrhu a konstrukce motorů je však takový, že motory se obecně navrhuje s oteplením, které odpovídá oteplení izolační třídy o jeden stupeň nižší. Nejčastěji používanou izolační třídou je pak třída **F**, motory v takovém případě mají oteplení v třídě **B** - označuje se **F/B**. Údaj o izolační třídě a využití je vždy uveden v technické dokumentaci k motoru.

Takový způsob návrhu motoru dává k dispozici další „skrytou“ výkonovou rezervu.



Obr. 2 Izolační třídy a maximální teploty vinutí v trvalém chodu

Pro výpočet změny oteplení motoru při přetížení motoru proudem  $I_x$  platí:

$$\Delta\Theta = \left( \left( \frac{I_x}{I_N} \right)^2 - 1 \right) \cdot 100$$

Změna využití **F/B** na **F/F** znamená zvýšení dovoleného oteplení o 25 K. Z toho vyplývá, že zatížení lze zvýšit o 12 %. Kontrola nárůstu oteplení:

$$\Delta\Theta = \left( (1,12)^2 - 1 \right) \cdot 100 = 25 \text{ K}$$

## 2.4 Souhrn změn v parametrech motoru při změně využití F/B na F/F

Nárůst oteplení  $\Delta\theta = ((1,12)^2 - 1) \times 100 = 25 \text{ K}$

Výkon  $P_{F/F} = 1,12 \times P_{F/B}$

Proudy - jmenovitý  $I_{F/F} = 1,12 \times I_{F/B}$

- záběrný  $I_{F/F - Z\acute{A}B} = I_{F/B - Z\acute{A}B} / 1,12$  v absolutní hodnotě se nezmění

Momenty - jmenovitý  $M_{F/F} = 1,12 \times M_{F/B}$

- záběrný  $M_{F/F - Z\acute{A}B} = M_{F/B - Z\acute{A}B} / 1,12$  v absolutní hodnotě se nezmění

- maximální  $M_{F/F - MAX} = M_{F/B - MAX} / 1,12$  v absolutní hodnotě se nezmění

Otáčky  $n_{F/F} = n_S - 1,12 \times (n_S - n_{F/B})$

Účinnost  $\eta_{F/F 100\%} = \eta_{F/B 100\%} - 0,11 \times (100 - \eta_{F/B 100\%})$

Účinník	$\cos \phi_{F/F 100\%} = \cos \phi_{F/B100\%}$
Hmotnost	se nemění
Moment setrvačnosti	se nemění

## 2.5 Posuzování kvality rozběhu

- podle průběhů momentové charakteristiky motoru a zatěžovacího momentu, velikosti dynamického momentu.
- podle velikosti momentu setrvačnosti. Uvedená kritéria jsou platná pro motory s osovou výškou 355 mm a větší.
  - lehký rozběh  $J_{EXT} < J_{MOT} \times 2p$
  - těžký rozběh  $J_{EXT} > J_{MOT} \times 2p$
- podle vypočtené délky doby rozběhu
  - lehký rozběh 3 – 7 s (odstředivá čerpadla, odlehčené kompresory)
  - polotěžký rozběh okolo 15 s
  - těžký rozběh nad 20 s (ventilátory, kompresory s velkým momentem setrvačnosti)

## 2.6 Doba chodu se zabrzděním rotorem a přípustná doba rozběhu

*Doba chodu se zabrzděním rotorem (Locked Rotor Time – LRT)* je doba po kterou může být asynchronní motor se zabrzděným rotorem připojený k tvrdé síti.

Tato doba je určena maximální přípustnou teplotou statoru resp. rotoru. Podle toho která část se rychleji oteplí na kritickou hodnotu rozlišují se stroje s kritickým oteplením statoru resp. rotoru.

Maximální přípustné hranice oteplení jsou určeny:

- u standardních motorů technologickými vlastnostmi použitých materiálů,
- u motorů do prostředí s nebezpečím výbuchu přípustnými povrchovými teplotami.

Technologická omezení:

Statorové vinutí: izolační materiály - třída F max. 210 °C  
 - třída H max. 235 °C

Rotorové vinutí: hliníková klec vyrobená tlakovým litím max. 300 °C  
 Cu klec svařovaná max. 400 °C  
 tyčové vinutí kroužkových motorů max. 250 °C  
 běžné vinutí kroužkových motorů dle izolační třídy viz. statorové vinutí.

Maximální přípustné povrchové teploty motorů do prostředí s nebezpečím výbuchu:

Pro teplotní třídu T3 max. 195 °C  
 Pro teplotní třídu T4 max. 130 °C  
 Pro teplotní třídu T5 max. 95 °C  
 Pro teplotní třídu T6 max. 80 °C

U motorů v provedení EEx e je zvláště používat označení  $t_E$ , které odpovídá LRT,  $LRT = t_E$

*Přípustná doba rozběhu (Allowable Runup Time – ART)*. Skutečná doba rozběhu musí být vždy kratší nebo jí rovná. Při větším počtu rozběhů za sebou, musí být úhrnná délka všech rozběhů za sebou kratší než přípustná doba rozběhu.

Protože během rozběhu se v závislosti na skulzu mění velikost proudu z hodnoty záběrného proudu na hodnotu jmenovitého proudu  $I_N$  při rozběhu se zátěží, resp. při rozběhu naprázdno bez zátěže na proud naprázdno ( $I_0 = 30 - 40 \% I_N$ ) je vždy přípustná doba rozběhu ART delší než přípustná doba chodu motoru se zabrzděním rotorem LRT.

Pro obvyklé motory platí  $ART = 1.7 \times LRT$

Oba údaje se liší svou velikostí pokud jsou udané pro „teplý“ resp. „studený“ provozní stav.



U motorů v provedení EEx e se s ohledem na bezpečnost provozu nerozlišuje při stanovení  $t_E$  (LRT) „teplý“ resp. „studený“ provozní stav. Pro oba stavy je určena pouze 1 hodnota  $t_E$ , ta méně příznivá (kratší). Tato hodnota  $t_E$  je uvedena v certifikátu nevybušnosti, který je součástí dokumentace k motoru a na štítku motoru.

## 2.7 Stanovení počtu rozběhů.

Počty rozběhů se stanovují ze studeného a teplého provozního stavu, pro známá  $ART_{WARM}$  a  $ART_{COULD}$ .

Teplým provozním stavem se rozumí stav, kdy byl motor dlouhodobě v provozu se jmenovitým výkonem a dosáhl ustáleného oteplení odpovídajícímu izolační třídě motoru.

Studeným provozním stavem se rozumí stav, kdy byl motor dlouhodobě odstavený a jeho teplota odpovídá teplotě okolí.

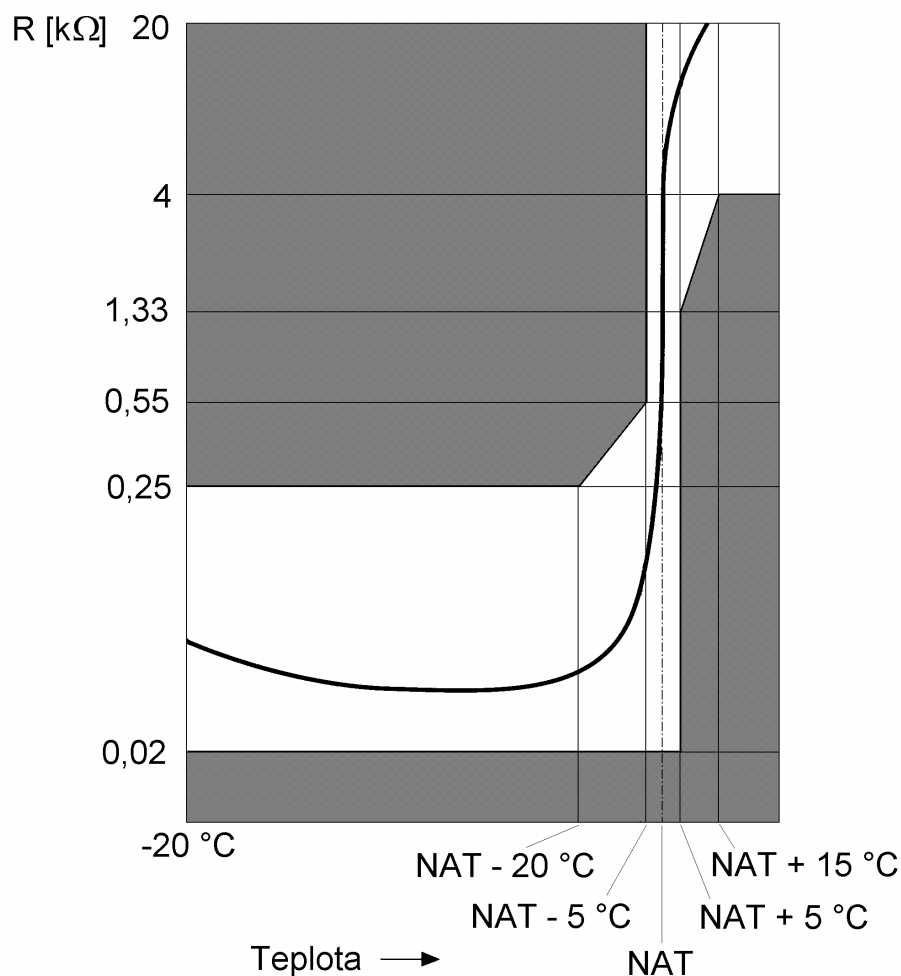
Počet rozběhů ze studeného stavu  $ART_{COULD} / t_R$ .

Počet rozběhů z teplého stavu  $ART_{WARM} / t_R$ .

Typickou hodnotou počtu rozběhů jsou 3 rozběhy ze studeného stavu a 2 z teplého.

## 2.8 Kontrola oteplení vinutí.

Pro kontrolu oteplení vinutí NN motorů se používají termistory. Jsou to teplotně závislé polovodičové prvky, které při dosažení vybavovací teploty (NAT) skokově mění svůj odpor (20 x a více) - viz. Obr. 3.



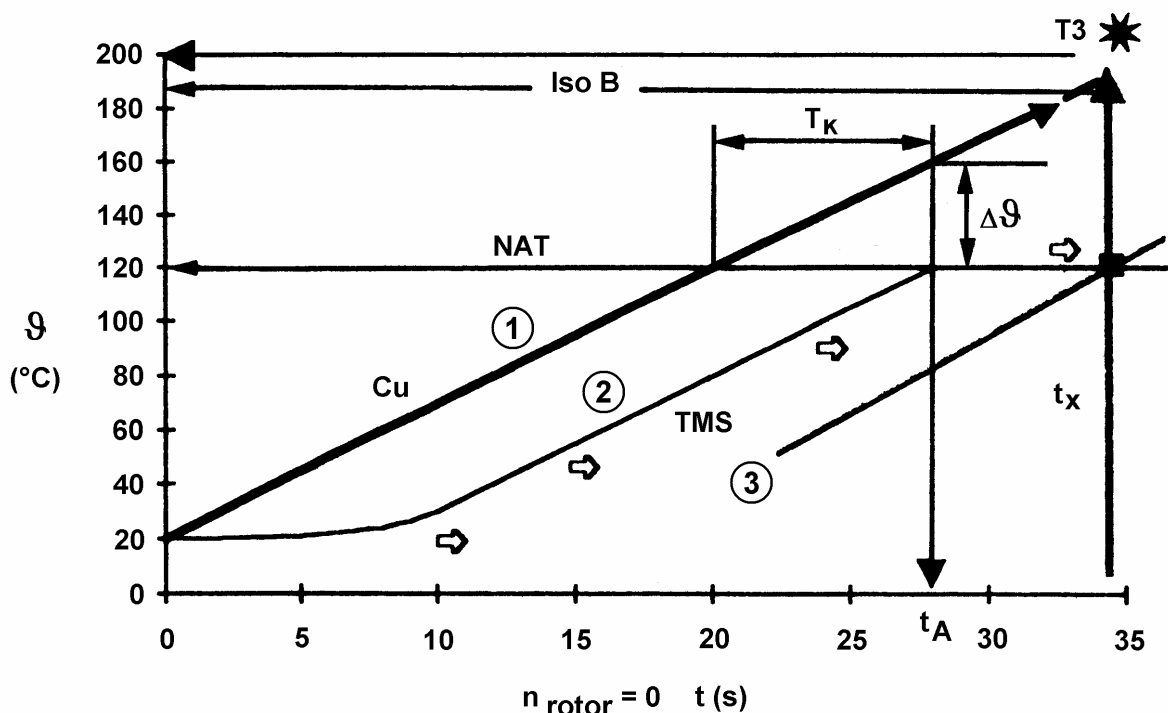
Obr. 3 Odporová charakteristika termistoru.

Rozlišují se dva druhy:

- **PTC** (Positive Temperature Coefficient) termistory s pozitivní charakteristikou - při překročení vybavovací teploty u nich dojde k řádovému nárůstu odporu
- **NTC** (Negative Temperature Coefficient) termistory s negativní charakteristikou – při překročení vybavovací teploty u nich dojde k řádovému poklesu odporu.

Vybavovací teplota je určena materiálovým složením termistoru. Termistory jsou dostupné pro mezní teploty v rozmezí od 60 °C do 190 °C. Stav termistorů se vyhodnocuje tzv. termistorovým relé, které převádí stav termistorů na binární signál I/O. Maximální příložitelné napětí na jeden termistor, tak aby nedošlo k jeho zničení je 2.5 V =.

Při zabudování termistorů do vinutí se provádí dodatečná izolace termistorů proti průrazu elektrickým napětím, která současně působí jako tepelná izolace a zhoršuje přestup tepla (tepelnou vodivost) mezi vinutím a termistorem. Stejný vliv má i kvalita založení termistorů – při založení mohou vzniknout vzduchové štěrby, které zhoršují přestup tepla. Důsledkem obojího je tepelná setrvačnost, která se v přechodných stavech projevuje rozdílnou teplotou vinutí a čidla viz. Obr. 4.



**Obr. 4** Oteplení vinutí motoru a vliv založení kvality termistorů na průběh oteplení indikovaného čidla (průběh oteplení vinutí - 1, průběh oteplení termistorů - 2 správně, 3 špatně)

Časový průběh oteplení vinutí a termistorů vyplývá z kalorimetrické rovnice:

$$R \cdot I^2 \cdot t = m \cdot c \cdot \Delta \theta$$

$$\Delta \theta = \frac{R \cdot I^2 \cdot t}{m \cdot c}$$

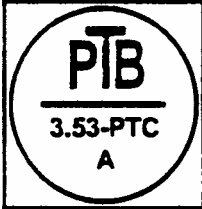
Zpoždění v oteplení termistorů se vyjadřuje časovou konstantou  $T_{\kappa}$  a teplotním rozdílem  $\Delta \theta$ . Vzniklý teplotní rozdíl se může a obvykle se kompenzuje vhodnou volbou vybavovací teploty termistorů (NAT). Termistory se vyrábí v odstupňování po 5 °C.

Největší význam má tepelná setrvačnost a správná volba termistorů u motorů v nevybušném provedení (EEx). Při typové zkoušce výrobce kontroluje optimální přiřazení vybavovací teploty termistorů k skutečnému oteplení vinutí. Zkouška se provádí při teplotě okolí 20 °C v nejméně příznivém provozním stavu – tj. v chodu nakrátko se zablockovaným rotorem při jmenovitém napětí, tj. když motorem protéká jmenovitý záběrný proud. Vybavovací doba se porovnává s hodnotami oteplení v měřicích bodech.


Pokud ochrana termistory není použita jako doplňková ochrana, ale přímo jako hlavní ochrana motoru před tepelným přetížením tj:

- u motoru napájeného ze sítě, u kterého není použita klasická nadproudá ochrana;
- u motoru napájeného z frekvenčního měniče, u kterého nikdy nelze klasickou nadproudou ochranu použít;

musí výrobce popsáním způsobem u každého takového motoru při kusové zkoušce přezkoušet vybavovací dobu termistorů, zda souhlasí s hodnotami zjištěnými na prototypovém motoru a ekvivalentních motorech stejného typu. Zjištěná vybavovací doba musí být uvedena na přídavném štítku viz. Obr. 5 Pokud motor takový štítek nemá, nelze ho použít popsáním způsobem. Při každém převinutí motoru se musí vybavovací doba přezkoušet měřením – odchylka od vybavovací doby stanovené výrobcem nesmí být větší jak 20%. V německy mluvících zemích se tato zkouška označuje zkratkou TMS.

EEx de II C T4	MoL No. 123 456 789	
Thermistor	DIN 44081-145	
Relais	PTB 3.53-PTC/A	
$T_A$	19 s $U_N$ 20 °C	
$I_A/I_N$	6,8	

<b>Thermistors PTC DIN 44081/82-145</b> <b>Relais funktionsgeprüft / function tested</b>  <b>II (2) G</b> $t_A$ 28 s / 20 °C $U_N$ $I_A/I_N$ 5,0
---

**Obr. 5** Vzory přídavných štítků o provedení kontroly vypínací schopnosti termistorů. Nahoře provedení platné do 30.6.2003. Dole provedení platné do od 1.7.2003

Pro kontrolu oteplení VN motorů se termistory nepoužívají, používají se odporové teploměry PT100, které umožňují průběžné měření okamžité teploty vinutí. Důvodem jsou:

- snížená přesnost vyhodnocování v důsledku dodatečné izolace termistorů pro napětí 6 kV;
- většina motorů od osové výšky 315 mm jsou stroje s kritickým oteplením rotoru.

Obráceně teploměry PT100 se nepoužívají zejména pro NN motory do osové výšky 315 mm – důvodem je podstatně větší cena teploměru a vyhodnocovacího zařízení pro odporové teploměry proti termistorům a termistorovému relé.

## 2.9 Kontrola poklesu napětí při rozběhu asynchronního motoru, asynchronním rozběhu synchronních strojů.

Při rozběhu je velikost záběrného proudu omezena pouze reaktancí nakrátko  $x_M$ . Zjednodušeně lze na první okamžik po připojení motoru k síti pohlížet jako na zkrat, kdy velikost zkratového proudu je omezena pouze velikostí reaktance nakrátko motoru.

Platí:

$$x_M = \frac{1}{i_Z} 100 [\%]$$

$$i_Z = \frac{I_Z}{I_N} [-]$$

Velikost poklesu napětí v síti závisí na tvrdosti sítě, vyjádřené jejím zkratovým výkonem a velikostí záběrného proudu motoru, která vyplývá při obvyklé hodnotě  $i_Z = \text{cca. } 6 I_N$  z výkonu motoru. Obecně platí, čím je při konstantním svorkovém napětí velikost záběrného proudu větší, tím má být síť tvrdší, jinak se zvětšuje pokles napětí při rozběhu.

Je třeba si uvědomit, že při stejném zkratovém výkonu v místě připojení, velikost poklesu napětí, při stejném výkonu motoru, není ovlivněná velikostí svorkového napětí – 400 V, 500 V.....6 kV, 10 kV - viz. **Poz.2**. Nicméně je pravda, že v praxi obvykle platí, čím je vyšší napěťová hladina, tím je i větší zkratový výkon v místě připojení a důsledkem toho je menší pokles napětí při rozběhu. Daleko větší význam má volba napěťové hladiny v místě připojení v kontextu dimenzování přívodních kabelů ( průřez a počet kabelů) – samozřejmě pokud je možné si vybrat.

$U_N$ [kV]	0,4		0,5		0,69		6		10	
$P_N$ [kW]	400		400		400		400		400	
$I_M$ [A]	695,00		555,00		403,00		47,00		28,20	
$i_Z$ [-]	6,00		6,00		6,00		6,00		6,00	
$X_M$ [Ohm]	0,06		0,09		0,16		12,28		34,12	
$S_{SKS}$ [MVA]	$X_S$ [Ohm]	Pokles [-]	$X_S$ [Ohm]	Pokles [-]	$X_S$ [Ohm]	Pokles [-]	$X_S$ [Ohm]	Pokles [-]	$X_S$ [Ohm]	Pokles [-]
1	0,1600	25,7%	0,2500	25,7%	0,476	25,7%	36,0000	25,7%	100,0000	25,7%
5	0,0320	63,4%	0,0500	63,4%	0,095	63,4%	7,2000	63,4%	20,0000	63,4%
7,5	0,0213	72,2%	0,0333	72,2%	0,063	72,2%	4,8000	72,2%	13,3333	72,2%
10	0,0160	77,6%	0,0250	77,6%	0,048	77,6%	3,6000	77,6%	10,0000	77,6%
15	0,0107	83,9%	0,0167	83,9%	0,032	83,9%	2,4000	83,9%	6,6667	83,9%
20	0,0080	87,4%	0,0125	87,4%	0,024	87,4%	1,8000	87,4%	5,0000	87,4%
30	0,0053	91,2%	0,0083	91,2%	0,016	91,2%	1,2000	91,2%	3,3333	91,2%
40	0,0040	93,3%	0,0063	93,3%	0,012	93,3%	0,9000	93,3%	2,5000	93,3%
50	0,0032	94,5%	0,0050	94,5%	0,010	94,5%	0,7200	94,5%	2,0000	94,5%
75	0,0021	96,3%	0,0033	96,3%	0,006	96,3%	0,4800	96,3%	1,3333	96,3%
100	0,0016	97,2%	0,0025	97,2%	0,005	97,2%	0,3600	97,2%	1,0000	97,2%
250	0,0006	98,9%	0,0010	98,9%	0,002	98,9%	0,1440	98,9%	0,4000	98,9%
500	0,0003	99,4%	0,0005	99,4%	0,001	99,4%	0,0720	99,4%	0,2000	99,4%
750	0,0002	99,6%	0,0003	99,6%	0,001	99,6%	0,0480	99,6%	0,1333	99,6%
1000	0,0002	99,7%	0,0003	99,7%	0,000	99,7%	0,0360	99,7%	0,1000	99,7%

**Tab. 1 Porovnání vypočtených poklesů napětí motoru 400 kW pro různá napětí a zkratové výkony.** (Poklesy napětí vypočtené pro obvyklé hodnoty zkratového výkonu pro dané napětí jsou zvýrazněné)

VN motory 6 kV se obvykle používají od výkonu 110 kW.

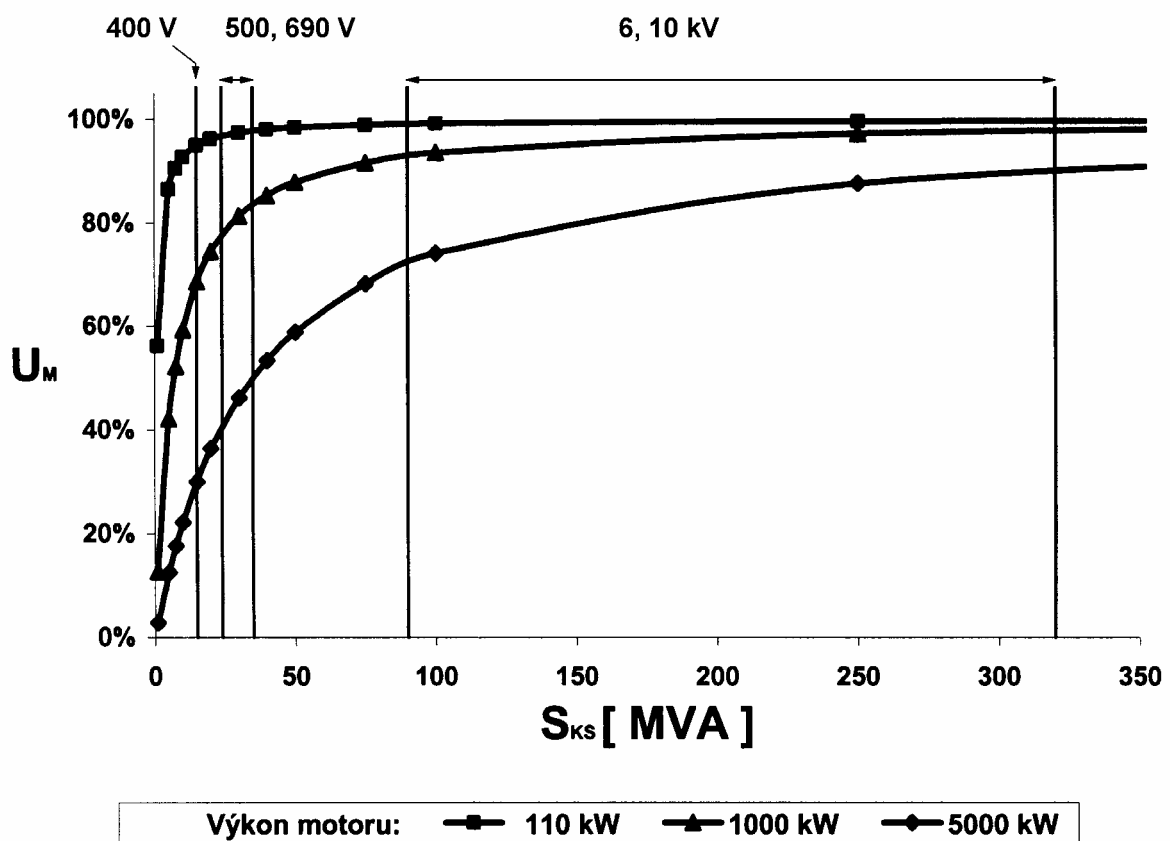
Maximální povolený pokles napětí dle ČSN činí 15 %, přičemž pokles o 10 % se považuje již za poměrně významný pokles.

U těžkých rozběhů se vždy musí zkontrolovat rozběhové podmínky - délka rozběhu, počet rozběhů pro průběh momentu motoru přepočtený pro vypočtený pokles napětí při rozběhu.

Typické hodnoty výkonů transformátorů pro jednotlivé napěťové hladiny a hodnoty zkratového výkonu:

400 V	1000 kVA	15 MVA
500, 690 V	1600 kVA	24 MVA
690 V	2000 kVA	29 MVA
690 V	2500 kVA	35 MVA
6, 10 kV	10 MVA	90 MVA
6, 10 kV	16 MVA	130 MVA
6, 10 kV	25 MVA	210 MVA
6, 10 kV	40 MVA	320 MVA

V soustavě 110 kV se zkratové výkony pohybují řádově v rozmezí od 800 do 3000 MVA.



Obr. 6 Poklesy napětí při rozběhu motoru v závislosti na „tvrdosti“ sítě

## 2.10 Postup výpočtu úbytku napětí při rozběhu motoru:

Údaje potřebné pro výpočet:

$S_{KS}$  zkratový výkon sítě.

$U_N$  napětí motoru [ kV ]

$I_N$  proud motoru [ kA ]

$S_T$  zdánlivý výkon transformátoru [ MVA ]

$u_k$  napětí nakrátko transformátoru [ % ]

Jako vztažné hodnoty zvolíme motorové veličiny. Vztažný výkon  $S_{VZ}$  volíme jako zdánlivý příkon motoru, vztažné napětí jako napětí motoru.

$$S_{VZ} = S_N = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N \text{ [MVA]}$$

Vztažná impedance  $Z_{VZ}$ :

$$Z_{VZ} = Z_N = \frac{U_N^2}{S_N} \text{ [\Omega]}$$

Reaktance sítě  $x_s$ :

$$x_s = \frac{S_{VZ}}{S_{KS}} \cdot 100 \text{ [%]}$$

Reaktance transformátoru přepočtená na skutečný vztažný výkon:

$$x_T = \frac{S_{VZ}}{S_T} \cdot x_k \text{ [%]} \quad ; \quad u_k = x_k$$

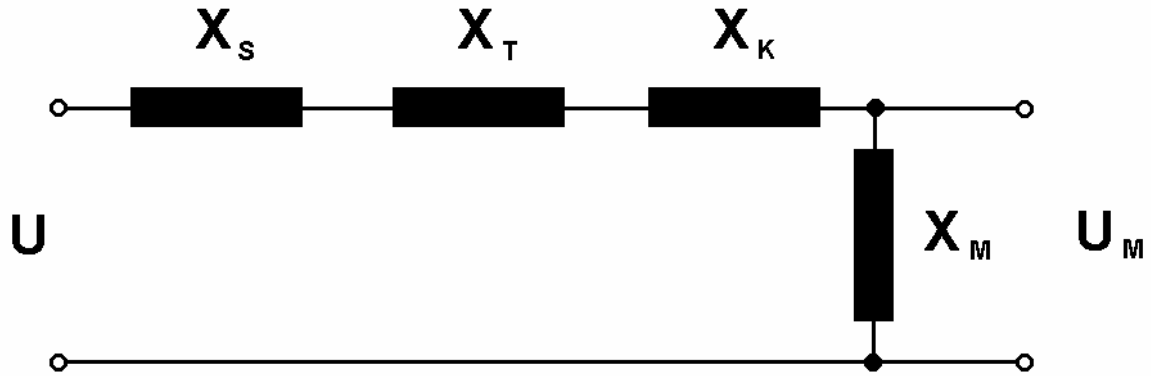
Reaktance kabelových tras přepočtená na skutečný vztažný výkon:

$$x_k = \frac{X_k}{Z_{VZ}} \cdot 100 \text{ [%]}$$

Reaktance motoru přepočtená na skutečný vztažný výkon.

Reaktanci motoru není nutné přepočítávat, protože jsme na začátku zvolili  $S_{VZ} = S_N$  jak vyplývá z dalšího:

$$x_M = \frac{S_{VZ}}{S_N} \cdot x_M \text{ [%]} \quad ; \quad x_M = \frac{1}{i_Z} 100 \text{ [%]}$$



Obr. 7 Náhradní schéma pro výpočet úbytků napětí při rozběhu motoru

Celková reaktance:

$$x_C = x_S + x_T + x_K + x_M [\%]$$

Proud při rozběhu motoru:

$$i = \frac{u}{x_C} [-] \quad ; \quad u = 100 [\%]$$

Proud při rozběhu motoru je vlivem předřazených reaktancí menší, než záběrný proud motoru  $i_z$ .  
Napětí na motoru – poměrná hodnota:

$$u_M = x_M \cdot i [\%]$$

Obdobným způsobem lze spočítat napětí a úbytky napětí na předchozích reaktancích, v zadaném napájecím bodě např. na transformátoru:

$$u_T = (x_M + x_T) \cdot i [\%]$$

$$\Delta u_T = x_T \cdot i [\%]$$

Z uvedeného postupu je zřejmé, že velikost záběrného proudu a tím velikost úbytku napětí na předchozích reaktancích reprezentujících předřazenou napájecí soustavu lze vhodně omezit vřazením reaktoru nebo tlumivky o reaktanci  $X_L$  před motor. Oba prvky mohou být zadány buď ohmickou hodnotou reaktance  $X_L$  nebo zdánlivým výkonem reaktoru  $S_L$  a hodnotou poměrnou  $x_L^*$ . Pak použijeme výrazy buď:

$$x_L = \frac{X_L}{Z_{VZ}} \cdot 100 [\%] \quad \text{nebo} \quad x_L = \frac{S_{VZ}}{S_L} \cdot x_L^* [\%]$$

**Pozn. 1:**

V řadě případů je možné použít zjednodušený postup, zejména pokud napájecí síť je respektovaná pouze zkratovým výkonem  $S_{KS}$  a mimo údaje motoru, žádné další údaje nejsou k dispozici.

Reaktance sítě:

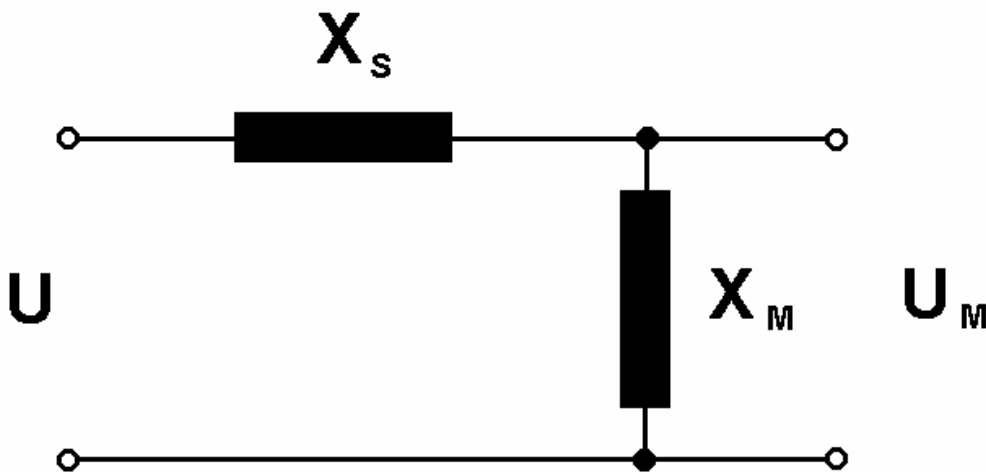
$$X_s = \frac{U_N^2}{S_{KS}} [\Omega]$$

Reaktance motoru v okamžiku připojení:

$$X_M = \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot I_z} [\Omega]$$

Napětí na motoru v okamžiku připojení viz. Obr. 8 – princip děliče napětí.

$$\frac{U_M}{U_N} = \frac{X_M}{X_s + X_M} [-]$$



Obr. 8 Zjednodušené náhradní schéma pro výpočet poklesu napětí při rozběhu motoru



**Pozn.2:** Proč velikost poklesu napětí při stejném zkratovém výkonu sítě a výkonu motoru nezávisí na velikosti svorkového napětí – 400 V, 500 V .....6 kV, 10 kV.

$$\frac{U_M}{U_N} = \frac{X_M}{X_S + X_M} = \frac{\frac{U_N}{\sqrt{3} I_Z}}{\frac{U_N^2}{\sqrt{3} U_N I_{SKS}} + \frac{U_N}{\sqrt{3} I_Z}} = \frac{I_{SKS}}{I_Z + I_{SKS}}$$

Pro zkratový proud při stejném zkratovém výkonu při různých napětích, pokud si zavedeme obecné, základní napětí  $U_0$  a proud  $I_{SKS0}$  - z rovnosti zkratových výkonů vyplývá:

$$I_{SKS} = I_{SKS0} \frac{U_0}{U_N}$$

Pro záběrný proud motoru při stejném výkonu motoru při různých napětích, pokud si zavedeme opět základní, obecné napětí  $U_0$  a obecný proud  $I_{M0}$  z rovnosti výkonů vyplývá (zanedbáváme různý  $\cos \varphi$  a  $\eta$ ):

$$I_M = I_{M0} \frac{U_0}{U_N}$$

Dále zavedeme ještě označení:

$$k = \frac{I_Z}{I_{MN}} [-]$$

Pokud vše dosadíme do rovnice pro výpočet poklesu napětí dostaneme výraz:

$$\frac{U_M}{U_N} = \frac{I_{SKS}}{I_Z + I_{SKS}} = \frac{I_{SKS0} \frac{U_0}{U_N}}{k I_{M0} \frac{U_0}{U_N} + I_{SKS0} \frac{U_0}{U_N}} = \frac{I_{SKS0}}{k I_{M0} + I_{SKS0}}$$

ze kterého vyplývá, že velikost poklesu napětí nezávisí na absolutní hodnotě záběrného proudu pro konkrétní napěťovou hladinu.

### **3 LITERATURA**

Elektrické pohony, Pavelka J., Čeřovský Z., Javůrek J., skriptum ČVUT  
Der Drehstrommotor, Falk K.

Drehzahlverstellung von Asynchronmaschinen, Schörner J, Seifert D., Technische Schriften 4, Loher AG.  
Interní materiály firem ELCOM a.s., Loher GmbH a ABB